А. В. Перышкин, Е. М. Гутник



ФИЗИКА

9





А. В. Перышкин, Е. М. Гутник



ФИЗИКА

Учебник

Рекомендовано
Министерством
образования и науки
Российской Федерации





Москва



2014

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
П27

ДРУЗЬЯ, чтобы самостоятельно:

- *проверить*, всё ли вы поняли в параграфе, надо ответить на **? Вопросы**;
- *закрепить* изученный материал, надо решить задачи из **УПРАЖНЕНИЯ**;
- *убедиться*, как физические законы действуют на практике, надо выполнить **ЗАДАНИЕ**;
- *расширить* свой кругозор, подготовить презентацию или доклад, надо изучить материал **Это любопытно...**;
- *исследовать* физическое явление и найти решение проблемы, необходимо подготовить **ПРОЕКТ**;
- *оценить* свои знания и уровень подготовки, надо проработать материал **ПРОВЕРЬ СЕБЯ** и тесты из **ЭЛЕКТРОННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ**;
- *научиться* пользоваться приборами, проверять теорию, делать выводы, надо выполнить **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**.

Термины, формулы, определения, которые необходимо запомнить, выделены особым шрифтом или цветом.

Перышкин, А. В.
П27 Физика. 9 кл. : учебник / А. В. Перышкин, Е. М. Гутник. — М. : Дрофа, 2014. — 319, [1] с. : ил.
ISBN 978-5-358-09883-1

Настоящая книга является продолжением учебников А. В. Перышкина «Физика. 7 класс» и «Физика. 8 класс». Она завершает курс физики основной школы и доработана в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта.

Большое количество красочных иллюстраций, разнообразные вопросы и задания, а также дополнительные сведения и любопытные факты способствуют эффективному усвоению учебного материала.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72

ISBN 978-5-358-09883-1

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вы приступаете к изучению последних тем курса физики основной школы.

В 9 классе вам предстоит не только получить новые знания, но расширить и углубить уже имеющиеся.

Например, если в 7 классе вы изучали равномерное движение, то в 9 классе перейдёте к рассмотрению движения неравномерного, познакомитесь с такой важной физической величиной, как ускорение, узнаете, что является причиной его возникновения, поймёте, почему в одних случаях тело движется прямолинейно, а в других — криволинейно, и многое, многое другое.

Знания о магнитном поле, полученные вами в 8 классе, будут полезны при рассмотрении в 9 классе таких важных явлений, как возникновение электромагнитного поля и излучение электромагнитных волн.

При изучении главы «Строение и эволюция Вселенной» вы убедитесь в том, что законы физики применимы и в астрономии.

Для учащихся, интересующихся физикой, в учебник помещён материал, отмеченный знаком ✳.



ЗАКОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ

§ 1 МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА. СИСТЕМА ОТСЧЁТА

В окружающем нас мире всё находится в непрерывном движении. Под движением в общем смысле этого слова подразумевают любые изменения, происходящие в природе. Наиболее простым видом движения является *механическое движение.*


Механическое движение воздушного шара

Из курса физики 7 класса вы знаете, что *механическим движением тела называется изменение его положения в пространстве относительно других тел, происходящее с течением времени.*

При решении различных научных и практических задач, связанных с механическим движением тел, нужно уметь описывать это движение, т. е. определять траекторию, скорость, пройденный путь, положение тела и некоторые другие характеристики движения для любого момента времени.

Например, запуская летательный аппарат с Земли на другую планету, учёные должны предварительно рассчитать, где находится эта планета относительно Земли в момент посадки на неё аппарата. А для этого необходимо выяснить, как меняются с течением времени направление и модуль скорости этой планеты и по какой траектории она движется.

Из курса математики вы знаете, что положение точки можно задать с помощью координатной прямой или прямоугольной системы координат (рис. 1). Но как задать положение тела,

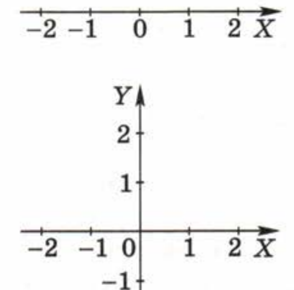


Рис. 1. Положение точки можно задать с помощью координатной прямой или прямоугольной системы координат

имеющего размеры? Ведь каждая точка этого тела будет иметь свою собственную координату.

При описании движения тела, имеющего размеры, возникают и другие вопросы. Например, что следует понимать под скоростью тела, если оно, перемещаясь в пространстве, одновременно вращается вокруг собственной оси? Ведь скорость разных точек этого тела будет различна как по модулю, так и по направлению. Например, при суточном вращении Земли диаметрально противоположные её точки движутся в противоположных направлениях, причём чем ближе к оси расположена точка, тем меньше её скорость.

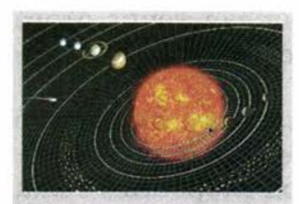
Каким же образом можно задать координату, скорость и другие характеристики движения тела, имеющего размеры? Оказывается, во многих случаях вместо движения реального тела можно рассматривать движение так называемой *материальной точки, т. е. точки, обладающей массой этого тела.*

Для материальной точки можно однозначно определить координату, скорость и другие физические величины, так как она не имеет размеров и не может вращаться вокруг собственной оси.

Материальных точек нет в природе. Материальная точка — это понятие, использование которого упрощает решение многих задач и при этом позволяет получить достаточно точные результаты.

Тело можно считать материальной точкой в тех случаях, когда его размерами (а значит, и формой, и вращением) можно пренебречь, поскольку они несущественны в условиях решаемой задачи.

Материальная точка — это понятие, вводимое в механике для обозначения тела, которое рассматривается как точка, имеющая массу.



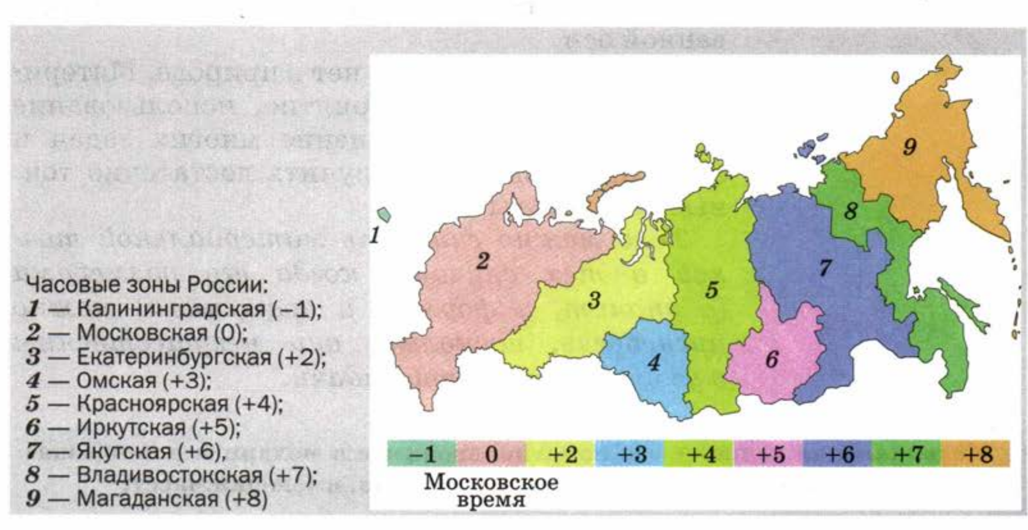
Материальными точками считают планеты при изучении их движения вокруг Солнца

Практически всякое тело можно рассматривать как материальную точку в тех случаях, когда расстояния, проходимые точками тела, очень велики по сравнению с его размерами.

Например, материальными точками считают Землю и другие планеты при изучении их движения вокруг Солнца. В данном случае различия в движении разных точек любой планеты, вызванные её суточным вращением, не влияют на величины, описывающие годовое движение.

Но при решении задач, связанных с суточным вращением планет (например, при определении времени восхода солнца в разных местах поверхности земного шара), считать планету материальной точкой бессмысленно, так как результат задачи зависит от размеров этой планеты и скорости движения точек её поверхности. Так, например, во Владимирской часовой зоне солнце взойдёт на 1 ч позже, в Иркутской — на 2 ч позже, а в Московской — на 8 ч позже, чем в Магаданской.

За материальную точку правомерно принять самолёт, если требуется, например, определить среднюю скорость его движения на пути из



Часовые зоны России:
1 — Калининградская (−1);
2 — Московская (0);
3 — Екатеринбургская (+2);
4 — Омская (+3);
5 — Красноярская (+4);
6 — Иркутская (+5);
7 — Якутская (+6),
8 — Владивостокская (+7);
9 — Магаданская (+8)



За материальную точку можно принять самолёт, летящий из одного города в другой

Москвы в Новосибирск. Но при вычислении силы сопротивления воздуха, действующей на летящий самолёт, считать его материальной точкой нельзя, поскольку сила сопротивления зависит от формы и скорости движения самолёта.

Тело, движущееся поступательно[1], можно принимать за материальную точку даже в том случае, если его размеры соизмеримы с проходимыми им расстояниями. Например, поступательно движется человек, стоящий на ступеньке движущегося эскалатора (рис. 2, *а*).

В любой момент времени все точки тела человека движутся одинаково. Поэтому если мы хотим описать движение человека (т. е. определить, как меняется со временем его скорость, путь и т. д.), то достаточно рассмотреть движение только одной его точки. При этом решение задачи значительно упрощается.

При прямолинейном движении тела достаточно одной координатной оси для определения его положения.

Например, положение тележки с капельницей (рис. 2, *б*), движущейся по столу прямолинейно и поступательно, в любой момент времени можно определить с помощью линейки, расположенной вдоль траектории движения (тележка с ка-

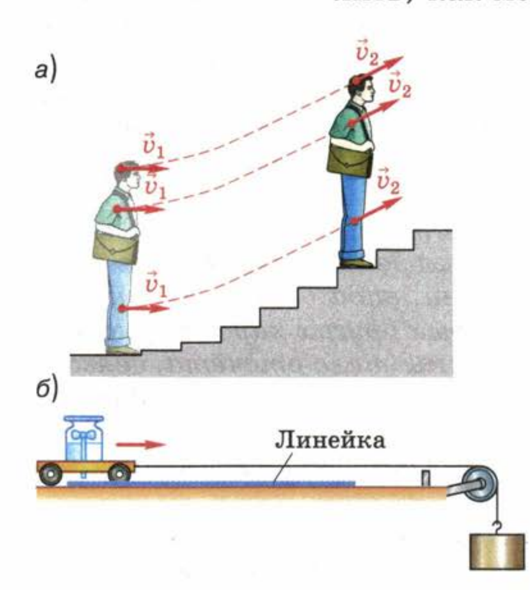


Рис. 2. При поступательном движении тела все его точки движутся одинаково

[1] Поступательное движение — движение тела, при котором прямая, соединяющая любые две точки этого тела, перемещается, оставаясь всё время параллельной своему первоначальному направлению. Поступательным может быть как прямолинейное, так и криволинейное движение. Например, поступательно движется кабина колеса обозрения.



Система отсчёта: тело отсчёта — здание речного вокзала; прямоугольная система координат *x*, *y*; часы

пельницей принимается за материальную точку). Линейку в этом опыте удобно принять за тело отсчёта, а её шкала может служить координатной осью. (Напомним, что *телом отсчёта* называется тело, относительно которого рассматривается изменение положения других тел в пространстве.) Положение тележки с капельницей будет определяться относительно нулевого деления линейки.

Но если необходимо определить, например, путь, который прошла тележка за определённый промежуток времени, или скорость её движения, то помимо линейки понадобится прибор для измерения времени — ***часы***.

В данном случае роль такого прибора выполняет капельница, из которой через равные промежутки времени падают капли. Поворачивая кран, можно добиться того, чтобы капли падали с интервалом, например, в 1 с. Посчитав число промежутков между следами капель на линейке, можно определить соответствующий промежуток времени.

Из приведённых примеров ясно, *что для определения положения движущегося тела в любой момент времени, вида движения, скорости тела и некоторых других характеристик движения необходимы тело отсчёта, связанная с ним система координат* (*или одна координатная ось, если тело движется вдоль прямой*) *и прибор для измерения времени*.

Система координат, тело отсчёта, с которым она связана, и прибор для измерения времени образуют систему отсчёта, относительно которой рассматривается движение тела.

Конечно, во многих случаях нельзя непосредственно измерить координаты движущегося тела в любой момент времени. У нас нет реальной возможности, например, расположить измерительную ленту и расставить наблюдате-

лей с часами вдоль многокилометрового пути движущегося автомобиля, плывущего по океану лайнера, летящего самолёта, снаряда, вылетевшего из артиллерийского орудия, различных небесных тел, движение которых мы наблюдаем, и т. д.

Тем не менее знание законов физики позволяет определить координаты тел, движущихся в различных системах отсчёта, в частности в системе отсчёта, связанной с Землёй.

? Вопросы

1. Что называется материальной точкой? **2.** С какой целью используется понятие «материальная точка»? **3.** В каких случаях движущееся тело обычно рассматривают как материальную точку? **4.** Приведите пример, показывающий, что одно и то же тело в одной ситуации можно считать материальной точкой, а в другой — нет. **5.** В каком случае положение движущегося тела можно задать с помощью одной координатной оси? **6.** Что такое система отсчёта?

УПРАЖНЕНИЕ 1

1. Можно ли считать автомобиль материальной точкой при определении пути, который он прошёл за 2 ч, двигаясь со средней скоростью, равной 80 км/ч; при обгоне им другого автомобиля?
2. Самолёт совершает перелёт из Москвы во Владивосток. Может ли рассматривать самолёт как материальную точку диспетчер, наблюдающий за его движением; пассажир этого самолёта?
3. Когда говорят о скорости машины, поезда и других транспортных средств, тело отсчёта обычно не указывают. Что подразумевают в этом случае под телом отсчёта?
4. Мальчик стоял на земле и наблюдал, как его младшая сестра каталась на карусели. После катания девочка сказала брату, что и он сам, и дома, и деревья быстро проносились мимо неё. Мальчик же стал утверждать, что он вместе с домами и деревьями был неподвижен, а двигалась сестра. Относительно каких тел отсчёта рассматривали движение девочка и мальчик? Объясните, кто прав в споре.
5. Относительно какого тела отсчёта рассматривают движение, когда говорят: а) скорость ветра равна 5 м/с; б) бревно плывёт по течению реки, поэтому его скорость равна нулю; в) скорость плывущего по реке дерева равна скорости течения воды в реке; г) любая точка колеса движущегося велосипеда описывает окружность; д) солнце утром восходит на востоке, в течение дня движется по небу, а вечером заходит на западе?

§ 2 ПЕРЕМЕЩЕНИЕ


За время взлёта самолёт проходит путь, равный длине траектории его движения от земли до верхней точки

До сих пор при решении многих задач, связанных с движением различных тел, мы пользовались физической величиной, называемой «путь». Под длиной пути подразумевалась сумма длин всех участков траектории, пройденных телом за рассматриваемый промежуток времени.

Путь — *скалярная величина* (т. е. величина, не имеющая направления).

Для решения различных практических задач в разных сферах деятельности (например, в диспетчерской службе наземного и воздушного транспорта, в космонавтике, астрономии и др.) необходимо уметь рассчитывать, где будет находиться движущееся тело в заданный момент времени.

Покажем, что не всегда можно решить такую задачу, даже зная, какой путь прошло тело за данный промежуток времени. Для этого обратимся к рисунку 3, *а*.

Допустим, нам известно, что некоторое тело (которое можно принять за материальную точку) начинает двигаться из точки O и за 1 ч проходит путь, равный 20 км.

Для ответа на вопрос, где будет находиться это тело спустя 1 ч после его выхода из точки O, у нас не хватает информации о его движении. Тело могло, например, двигаясь прямолинейно в северном направлении, попасть в точку A, находящуюся на расстоянии 20 км от

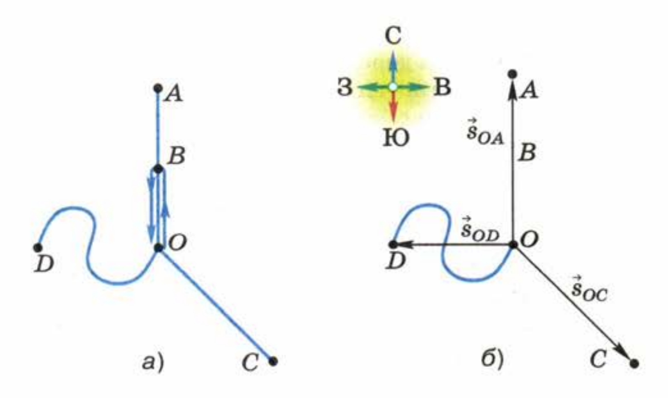


Рис. 3. Знание пройденного телом пути не является достаточным для определения конечного положения тела

точки O (расстояние между точками измеряется по прямой, соединяющей эти точки). Но оно могло также, дойдя до точки B, находящейся на расстоянии 10 км от точки O, повернуть на юг и вернуться в точку O, при этом пройденный им путь тоже будет равен 20 км. При заданном значении пути тело также могло оказаться и в точке C, если бы оно двигалось прямолинейно на юго-восток, и в точке D, если бы его движение происходило по изображённой криволинейной траектории.

Чтобы избежать такой неопределённости, для нахождения положения тела в пространстве в заданный момент времени была введена физическая величина, называемая ***перемещением***.

Перемещением тела (материальной точки) называется вектор, соединяющий начальное положение тела с его последующим положением.

Согласно определению перемещение — *векторная величина* (т. е. величина, имеющая направление). Оно обозначается $\vec{s}$, т. е. той же буквой, что и путь, только со стрелкой над ней. Как и путь, в СИ[1] перемещение измеряется в *метрах*. Для измерения перемещения используются и другие единицы длины, например километры, мили и т. д.

На рисунке 3, *б* показаны векторы перемещений, которые совершило бы тело, если бы прошло 20 км следующим образом: по прямолинейной траектории OA в северном направлении (вектор $\vec{s}_{OA}$), по прямолинейной траектории OC в юго-восточном направлении (вектор $\vec{s}_{OC}$) и по криволинейной траектории OD (век-

---

[1] Напомним, что в СИ (Международная система единиц) единицей массы является килограмм (кг), длины — метр (м), времени — секунда (с). Они называются основными, так как выбраны независимо от единиц других величин. Единицы, определяемые через основные, называются производными. Примерами производных единиц СИ могут служить м/с, кг/м^3 и многие другие.

тор $\vec{s}_{OD}$). А если бы тело прошло 20 км, дойдя до точки B и вернувшись обратно в точку O, то в этом случае вектор его перемещения был бы равен нулю.

Зная начальное положение и вектор перемещения тела, т. е. его направление и модуль, можно однозначно определить, где это тело находится. Например, если известно, что вектор перемещения тела, вышедшего из точки O, направлен на север, а его модуль равен 20 км, то мы с уверенностью можем утверждать, что тело находится в точке A (см. рис. 3, *б*).

Таким образом, на чертеже, где перемещение изображается стрелочкой определённой длины и направления, можно найти конечное положение тела, отложив от его начального положения вектор перемещения.



1. Всегда ли можно определить положение тела в заданный момент времени t, зная начальное положение этого тела (при $t_0 = 0$) и путь, пройденный им за промежуток времени t? Ответ подтвердите примерами. **2.** Что называют перемещением тела (материальной точки)? **3.** Можно ли однозначно определить положение тела в заданный момент времени t, зная начальное положение этого тела и вектор перемещения, совершённого телом за промежуток времени t? Ответ подтвердите примерами.



УПРАЖНЕНИЕ 2

1. Какую физическую величину определяет водитель автомобиля по спидометру — пройденный путь или перемещение?
2. Как должен двигаться автомобиль в течение некоторого промежутка времени, чтобы по спидометру можно было определить модуль перемещения, совершённого автомобилем за этот промежуток времени?

§ 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТЫ ДВИЖУЩЕГОСЯ ТЕЛА

В предыдущем параграфе говорилось о том, что положение тела, совершившего некоторое перемещение, можно найти графически, отложив вектор перемещения от начального положения этого тела. Но в большинстве случаев

необходимо *вычислить* положение тела, т. е. определить его координаты.

Известно, что вычисления производят не с векторами, а с соответствующими им скалярными величинами: с *проекциями векторов* на координатные оси и с *модулями векторов* или их проекций (т. е. с величинами, представляющими собой положительные или отрицательные числа, но не имеющими направления).

Покажем, как определить координату движущегося тела, зная координату его начального положения и вектор перемещения. Для этого решим задачу.

Два катера идут по реке в противоположных направлениях и встречаются в 100 км к востоку от пристани П (рис. 4). Продолжая движение, за некоторый промежуток времени t первый катер переместился от места встречи на 60 км к востоку, а второй — на 50 км к западу. Определите координаты каждого катера относительно пристани и расстояние между катерами через промежуток времени t после их встречи.

Проведём координатную ось OX параллельно прямой, вдоль которой движутся катера, и направим её на восток. Начало этой оси ($x = 0$) — точку O — совместим с пристанью, приняв её за тело отсчёта (поскольку в задаче требуется определить положение катеров по отношению к пристани).

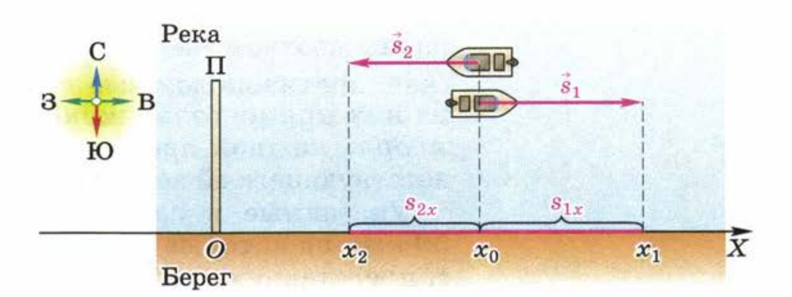


Рис. 4. Определение координаты движущегося тела

Спроецировав начала и концы векторов перемещения $\vec{s}_1$ и $\vec{s}_2$ на ось OX, получим отрезки s_{1x} и s_{2x}, которые являются *проекциями указанных векторов*. Проекция вектора на ось считается положительной, если вектор сонаправлен с этой осью, и отрицательной, если вектор направлен противоположно оси.

Значит, в данном случае $s_{1x} > 0$, а $s_{2x} < 0$.

Из рисунка 4 видно, что координаты x_1 и x_2 можно найти следующим образом:

$$x_1 = x_0 + s_{1x}, \quad (1)$$

$$x_2 = x_0 + s_{2x}. \quad (2)$$

Расстояние l между двумя телами, как известно, равно модулю разности их координат:

$$l = |x_1 - x_2|. \quad (3)$$

По уравнениям (1) и (2) можно рассчитать искомые координаты x_1 и x_2. Но какие числа следует подставить в уравнения (1) и (2) вместо символов x_0, s_{1x} и s_{2x}?

Согласно условию задачи катера встретились на расстоянии 100 км от пристани, значит, длина отрезка Ox_0 равна 100 км. Из рисунка 4 видно, что координата x_0 находится на положительной полуоси OX, т. е. $x_0 > 0$. Значит, $x_0 = 100$ км.

Поскольку ось OX параллельна векторам перемещений катеров, длины проекций s_{1x} и s_{2x} равны соответственно длинам векторов $\vec{s}_1$ и $\vec{s}_2$ (как противоположные стороны построенных на них прямоугольников). А это означает, что *модуль* каждой проекции равен *модулю* соответствующего ей вектора.

Указанные в задаче расстояния (60 км и 50 км), на которые сместились катера за время t, представляют собой *модули векторов их пе-*

ремещений. Значит, модуль проекции s_{1x} равен 60 км, а модуль проекции s_{2x} равен 50 км.

Поскольку проекция s_{1x} положительна, то можно записать: s_{1x} = 60 км. Но проекция s_{2x} отрицательна, поэтому s_{2x} = –50 км.

Теперь запишем условие задачи и решим её.

Дано:	**Решение:**
$x_0 = 100$ км $s_{1x} = 60$ км $s_{2x} = -50$ км	$x_1 = x_0 + s_{1x}$; $x_2 = x_0 + s_{2x}$; $l = \lvert x_1 - x_2 \rvert$;
x_1 — ? x_2 — ? l — ?	$x_1 = 100$ км + 60 км = 160 км; $x_2 = 100$ км – 50 км = 50 км; $l = \lvert 160$ км – 50 км$\rvert = 110$ км.

Ответ: $x_1 = 160$ км, $x_2 = 50$ км, $l = 110$ км.



Вопросы

1. С какими величинами производят вычисления — с векторными или скалярными? **2.** При каком условии проекция вектора на ось будет положительной, а при каком — отрицательной? **3.** Запишите уравнение, с помощью которого можно определить координату тела, зная координату его начального положения и вектор перемещения.

УПРАЖНЕНИЕ 3

1. Мотоциклист, переехав через мост, движется по прямолинейному участку дороги. У светофора, находящегося на расстоянии 10 км от моста, мотоциклист встречает велосипедиста. За 0,1 ч с момента встречи мотоциклист перемещается на 6 км, а велосипедист — на 2 км от светофора (при этом оба они продолжают двигаться прямолинейно в противоположных направлениях).

Определите координаты мотоциклиста и велосипедиста и расстояние между ними спустя 0,1 ч после их встречи.

Указание: начертите ось X, направив её в сторону движения мотоциклиста и приняв за тело отсчёта мост. Обозначьте на этой оси координату светофора ($x_с$), координаты велосипедиста ($x_в$) и мотоциклиста ($x_м$), которые они имели через 0,1 ч после встречи. Над осью начертите и обозначьте векторы перемещений велосипедиста ($\vec{s}_в$) и мотоциклиста ($\vec{s}_м$), а на оси — проекции этих векторов ($s_{вx}$ и $s_{мx}$).

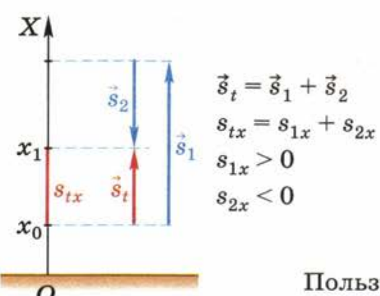


Рис. 5

2. Мальчик держит в руках мяч на высоте 1 м от поверхности земли. Затем он подбрасывает мяч вертикально вверх. За некоторый промежуток времени t мяч успевает подняться на 2,4 м от своего первоначального положения, достигнув при этом точки наибольшего подъёма, и опуститься от этой точки на 1,25 м (рис. 5).

Пользуясь этим рисунком, определите: а) координату x_0 начального положения мяча; б) проекцию s_{tx} вектора перемещения $\vec{s}_t$, совершённого мячом за время t; в) координату x_t, которую имел мяч через промежуток времени t после броска.

§ 4 ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

Во всех рассмотренных нами примерах и задачах по определению координат тела вектор перемещения был известен (т. е. были известны его модуль и направление).

А как найти вектор перемещения, если он не задан?

Проще всего получить формулу для определения вектора перемещения для тела, движущегося прямолинейно и *равномерно* (т. е. движущегося по прямолинейной траектории и проходящего за любые равные промежутки времени одинаковые пути).

Согласно определению,

скорость равномерного прямолинейного движения — это постоянная векторная величина, равная отношению перемещения тела за любой промежуток времени к значению этого промежутка.

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}. \qquad (1)$$

$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$

Из формулы (1) можно найти перемещение для прямолинейного равномерного движения:

$$\vec{s} = \vec{v}t. \quad (2)$$

При решении большинства задач на нахождение векторных величин (перемещения, скорости, силы и др.) необходимо знать, как эти величины направлены по отношению друг к другу. Об этом можно судить, в частности, по уравнениям, записанным в векторной форме. Например, формулы (1) и (2) свидетельствуют о том, что при прямолинейном равномерном движении векторы скорости и перемещения направлены в одну и ту же сторону.

Но для *расчёта* перемещения применяют формулу, в которую входят проекции векторов на ось:

$$s_x = v_x t. \quad (3)$$

Напомним, что по знаку проекции можно судить о том, как направлен соответствующий ей вектор по отношению к выбранной оси. Но если при решении задачи на прямолинейное движение нас не интересует направление векторов перемещения и скорости, то можно воспользоваться формулой, в которую входят их модули:

$$s = vt. \quad (4)$$

Формула (4) вам давно знакома — вы часто использовали её при решении задач по физике и математике. Только под буквой s подразумевался пройденный телом путь. Почему же теперь мы говорим, что s — это модуль вектора перемещения?

Дело в том, что *при движении в одном направлении модуль вектора перемещения, совершённого телом за некоторый промежуток времени, равен пути, пройденному этим телом за тот же промежуток времени.*

Справедливость этого утверждения наглядно иллюстрируется рисунком 3. Из этого рисунка видно, что в тех случаях, когда тело не меняет направления своего движения (т. е. при движении из точки O в точку A и из точки O в точку C), модуль вектора перемещения равен пройденному пути. *Если же направление движения тела меняется* (т. е. при переходе из точки O в точку B и обратно и при движении из точки O в точку D по криволинейной траектории), *то пройденный путь окажется больше модуля вектора перемещения.*

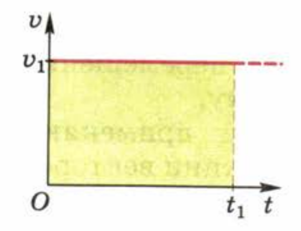


Рис. 6. Определение модуля вектора перемещения равномерно движущегося тела

На рисунке 6 представлен график зависимости *модуля вектора скорости* v *от времени* t при равномерном движении тела. С такими графиками вы уже встречались при изучении физики в 7 классе (тогда их называли графиками зависимости *скорости от времени*).

Модуль вектора перемещения s, совершённого телом за промежуток времени t_1, в данном случае определяется по формуле:

$$s = v_1 t_1.$$

Но произведение $v_1 t_1$ численно равно также и площади S закрашенного прямоугольника, так как отрезки v_1 и t_1 (или, что то же самое, Ov_1 и Ot_1) являются смежными сторонами этого прямоугольника.

Таким образом, *при прямолинейном равномерном движении тела модуль вектора его перемещения численно равен площади прямоугольника, заключённого между графиком скорости, осью Ot и перпендикулярами к этой оси, восставленными из точек, соответствующих моментам начала и конца наблюдения (в данном случае из точек O и t_1). Часто эту площадь называют площадью под графиком скорости.*

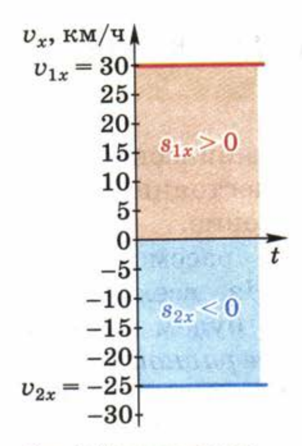


Рис. 7. Определение проекций перемещений двух тел

Поскольку при решении большинства задач придётся иметь дело не только с модулями, но и с проекциями векторов, рассмотрим график зависимости проекции вектора скорости от времени.

Для этого обратимся ещё раз к задаче с двумя катерами, идущими прямолинейно и равномерно в противоположных направлениях (см. § 3, рис. 4). Допустим, что промежуток времени t, за который катера совершили указанные перемещения, равен 2 ч. За 2 ч первый катер переместился на 60 км, а второй — на 50 км. Значит, модуль вектора скорости первого катера равен 30 км/ч, а второго — 25 км/ч.

Так как проекции векторов скорости и перемещения первого катера положительны, а второго — отрицательны, то $\upsilon_{1x} = 30$ км/ч, $s_{1x} = 60$ км, а $\upsilon_{2x} = -25$ км/ч, $s_{2x} = -50$ км.

Числовые значения проекций векторов скорости с соответствующими знаками, а также знаки проекций совершённых катерами перемещений, численно равных площадям под графиками, приведены на рисунке 7.



1. Что называется скоростью равномерного прямолинейного движения? **2.** Как найти проекцию вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно и равномерно, если известны проекция вектора скорости и время движения? **3.** При каком условии модуль вектора перемещения, совершённого телом за некоторый промежуток времени, равен пути, пройденному телом за тот же промежуток времени? **4.** Какую информацию о движении двух тел можно получить по графикам, изображённым на рисунке 7?

УПРАЖНЕНИЕ 4

1. Может ли график зависимости модуля вектора скорости от времени располагаться под осью Ot (т. е. в области отрицательных значений оси скорости)?

2. Постройте графики зависимости проекций векторов скорости от времени для трёх автомобилей, движущихся прямолинейно и равномерно, если два из них едут в одном направлении, а третий — навстречу им. Скорость первого автомобиля равна 60 км/ч, второго — 80 км/ч, а третьего — 90 км/ч.

§ 5 ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ. УСКОРЕНИЕ

В 7 классе вы изучали механическое движение тел, происходящее с постоянной скоростью, т. е. *равномерное* движение.

Теперь мы переходим к рассмотрению *неравномерного* движения. Из всех видов неравномерного движения мы будем изучать самое простое — *прямолинейное равноускоренное*, при котором тело движется вдоль прямой линии, а проекция вектора скорости тела за любые равные промежутки времени меняется одинаково (при этом модуль вектора скорости может как увеличиваться, так и уменьшаться).



Самолёт, равноускоренно разгоняющийся по взлётной полосе

Например, если скорость движущегося по взлётной полосе самолёта за любые 10 с увеличивается на 15 м/с, за любые 5 с — на 7,5 м/с, в каждую секунду — на 1,5 м/с и т. д., то самолёт движется равноускоренно.

В данном случае под скоростью движения самолёта подразумевается его так называемая ***мгновенная скорость***, т. е. *скорость в каждой конкретной точке траектории в соответствующий момент времени* (более строгое определение мгновенной скорости будет дано в курсе физики старших классов).

Мгновенная скорость тел, движущихся равноускоренно, может меняться по-разному: в одних случаях быстрее, в других — медленнее. Например, скорость обычного пассажирского лифта средней мощности за каждую секунду разгона увеличивается на 0,4 м/с, а скоростного — на 1,2 м/с. В таких случаях говорят, что тела движутся с разным *ускорением*.

Рассмотрим, какая физическая величина называется ускорением.

Пусть скорость некоторого тела, движущегося равноускоренно, за промежуток времени t

изменилась от v_0 до v. Под v_0 подразумевается начальная скорость тела, т. е. скорость в момент $t_0 = 0$, принятый за начало отсчёта времени. А v — это скорость, которую тело имело к концу промежутка времени t, отсчитываемого от $t_0 = 0$. Тогда за каждую единицу времени скорость менялась на величину, равную $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$.

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$$

Это отношение обозначается символом $\vec{a}$ и называется ***ускорением***:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

Ускорением тела при прямолинейном равноускоренном движении называется векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло.

Равноускоренное движение — это движение с постоянным ускорением.

Ускорение — векторная величина, которая характеризуется не только модулем, но и направлением.

Модуль вектора ускорения показывает, на сколько меняется модуль вектора скорости в каждую единицу времени. Чем больше ускорение, тем быстрее меняется скорость тела.

За единицу ускорения в СИ принимается ускорение такого равноускоренного движения, при котором за 1 с скорость тела изменяется на 1 м/с:

$$\frac{1 \text{ м/с}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ м/с}^2.$$

Таким образом, в СИ единицей ускорения является *метр на секунду в квадрате* (**м/с^2**).

Применяются и другие единицы ускорения, например 1 см/с^2.

Вычислить ускорение тела, движущегося прямолинейно и равноускоренно, можно с

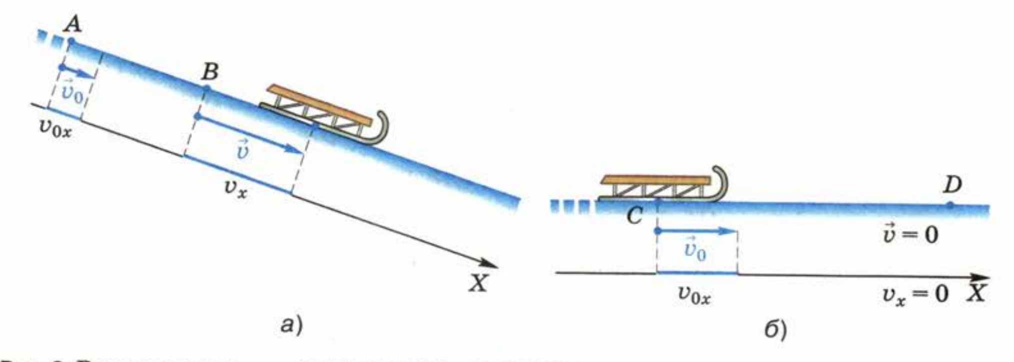


Рис. 8. Равноускоренное движение санок, скатывающихся с горы (AB) и продолжающих движение по равнине (CD)

помощью следующего уравнения, в которое входят проекции векторов ускорения и скорости:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}.$$

Покажем на конкретных примерах, как находится ускорение.

На рисунке 8, *а* изображены санки, которые равноускоренно скатываются с горы.

Известно, что участок пути AB санки прошли за 4 с. При этом в точке A они имели скорость, равную 0,4 м/с, а в точке B — скорость, равную 2 м/с (санки приняты за материальную точку).

Определим, с каким ускорением двигались санки на участке AB.

В данном случае за начало отсчёта времени следует принять момент прохождения санками точки A, поскольку согласно условию именно от этого момента отсчитывается промежуток времени, за который модуль вектора скорости изменился от 0,4 до 2 м/с.

Теперь проведём ось X, параллельную вектору скорости движения санок и направленную в ту же сторону. Спроецируем на неё начала и концы векторов $\vec{v}_0$ и $\vec{v}$. Образовавшиеся при этом отрезки v_{0x} и v_x являются проекциями векторов $\vec{v}_0$ и $\vec{v}$ на ось X. Обе эти проекции положительны и равны модулям соответствующих векторов: $v_{0x} = 0{,}4$ м/с, $v_x = 2$ м/с.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:	Решение:
$v_{0x} = 0{,}4$ м/с $v_x = 2$ м/с $t = 4$ с	$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$;
a_x — ?	$a_x = \frac{2\text{ м/с} - 0{,}4\text{ м/с}}{4\text{ с}} =$ $= 0{,}4\ \frac{\text{м/с}}{\text{с}} = 0{,}4\text{ м/с}^2$.

Ответ: $a_x = 0{,}4$ м/с^2.

Проекция вектора ускорения на ось X получилась положительной, значит, вектор ускорения сонаправлен с осью X и со скоростью движения санок.

Если векторы скорости и ускорения направлены в одну сторону, то скорость растёт.

Теперь рассмотрим другой пример, в котором санки, скатившись с горы, движутся по горизонтальному участку CD (рис. 8, *б*).

В результате действия на санки силы трения их скорость непрерывно уменьшается, и в точке D санки останавливаются, т. е. их скорость равна нулю. Известно, что в точке C санки имели скорость 1,2 м/с, а участок CD был пройден ими за 6 с.

Рассчитаем ускорение санок в этом случае, т. е. определим, на сколько менялась скорость санок за каждую единицу времени.

Началом отсчёта времени будем считать момент, когда санки проходят точку C. Тогда модуль вектора начальной скорости равен 1,2 м/с, а конечной — нулю.

Проведём ось X параллельно отрезку CD и сонаправим её со скоростью движения санок, как показано на рисунке. При этом проекция вектора скорости санок на ось X в любой момент их движения будет положительна и равна модулю вектора скорости. В частности, при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 1{,}2$ м/с, а при $t = 6$ с $v_x = 0$.

Запишем данные и вычислим ускорение.

Дано:	Решение:
$\upsilon_{0x} = 1{,}2$ м/с $\upsilon_x = 0$ $t = 6$ с	$a_x = \dfrac{\upsilon_x - \upsilon_{0x}}{t}$;
a_x — ?	$a_x = \dfrac{0 - 1{,}2 \text{ м/с}}{6 \text{ с}} = -0{,}2 \text{ м/с}^2$.

Ответ: $a_x = -0{,}2$ м/с^2.

Проекция ускорения на ось X отрицательна. Это значит, что вектор ускорения $\vec{a}$ направлен противоположно оси X и соответственно противоположно скорости движения. При этом скорость санок уменьшалась.

Таким образом, если векторы скорости и ускорения движущегося тела направлены в одну сторону, то модуль вектора скорости тела увеличивается, а если в противоположные — уменьшается.



1. К какому виду движения — равномерному или неравномерному — относится прямолинейное равноускоренное движение? **2.** Что понимают под мгновенной скоростью неравномерного движения? **3.** Дайте определение ускорения равноускоренного движения. Какова единица ускорения? **4.** Что такое равноускоренное движение? **5.** Что показывает модуль вектора ускорения? **6.** При каком условии модуль вектора скорости движущегося тела увеличивается; уменьшается?



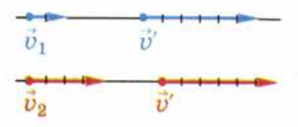


Рис. 9

1. За один и тот же промежуток времени t модуль вектора скорости первого автомобиля изменился от υ_1 до υ', а второго — от υ_2 до υ' (векторы скорости изображены в одинаковом масштабе на рисунке 9). Какой из автомобилей двигался в указанный промежуток с бóльшим ускорением? Скорость какого из них возрастала быстрее?

2. Самолёт, разгоняясь перед взлётом, в течение некоторого промежутка времени двигался равноускоренно. Каково было при этом ускорение самолёта, если за 30 с его скорость возросла от 10 до 55 м/с?

3. С каким ускорением двигался поезд на некотором участке пути, если за 12 с его скорость возросла на 6 м/с?

§ 6 СКОРОСТЬ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ. ГРАФИК СКОРОСТИ

Вам известно, что при прямолинейном равноускоренном движении проекцию вектора ускорения на ось X можно найти по формуле:

$$a_x = \frac{\upsilon_x - \upsilon_{0x}}{t}.$$

Выразим из этой формулы проекцию υ_x вектора скорости $\vec{\upsilon}$, которую имело движущееся тело к концу промежутка времени t, отсчитываемого от момента начала наблюдения, т. е. от $t_0 = 0$:

$$a_x t = \upsilon_x - \upsilon_{0x},$$
$$\upsilon_x = \upsilon_{0x} + a_x t.$$

Если в начальный момент тело покоилось, т. е. $\vec{\upsilon}_0 = 0$, то для этого случая последняя формула принимает вид:

$$\upsilon_x = a_x t.$$

Представим зависимость проекции вектора скорости от времени при равноускоренном движении в виде графика.

Из курса математики вам известна линейная функция $y = kx + b$, где x — аргумент, k — постоянный коэффициент, b — свободный член. Графиком этой функции является прямая.

Функция $\upsilon_x = \upsilon_{0x} + a_x t$ (или, что то же самое, $\upsilon_x = a_x t + \upsilon_{0x}$) тоже линейная с аргументом t, постоянным коэффициентом a_x и свободным членом υ_{0x}. Значит, графиком этой функции тоже должна быть прямая. Расположение этой линии по отношению к осям координат определяется значениями a_x и υ_{0x}.

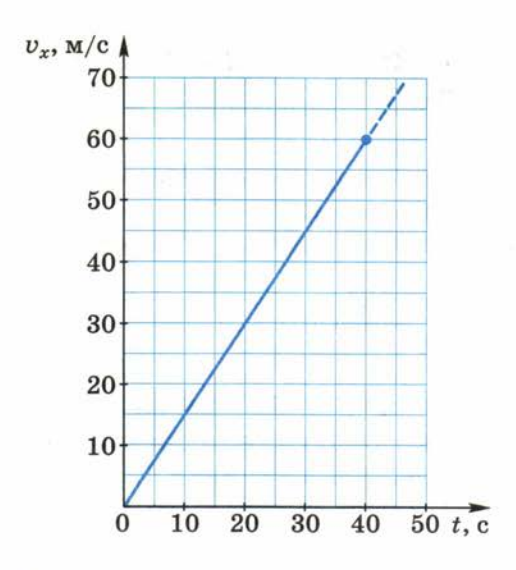


Рис. 10. График функции $v_x = 1,5t$ (м/с)

Построим, например, график зависимости от времени проекции вектора скорости разгоняющегося перед взлётом самолёта, который движется из состояния покоя прямолинейно с ускорением 1,5 м/с^2 в течение 40 с.

Сонаправим ось X со скоростью движения самолёта. Тогда проекции векторов скорости и ускорения будут положительны.

Для построения заданной прямой достаточно знать координаты (т. е. t и v_x) двух любых её точек. Задав два произвольных значения t, по формуле $v_x = a_x t$ можно определить соответствующие значения v_x.

Например, при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 0$; при $t = 40$ с $v_x = 1,5$ м/с^2 · 40 с = 60 м/с. По координатам первой из найденных точек видно, что график зависимости скорости от времени пройдёт через начало координат (рис. 10).

Теперь построим аналогичный график для случая, когда начальная скорость не равна нулю (при том, что модуль скорости, как и в предыдущем примере, возрастает). Для этого воспользуемся таким примером.

По дороге едет автомобиль со скоростью 10 м/с (36 км/ч). Водитель автомобиля, увидев дорожный знак, снимающий ограничение скорости, нажал на педаль газа, в результате чего автомобиль стал двигаться с постоянным ускорением 1,4 м/с^2. Построим график зависимости от времени проекции вектора мгновенной скорости на ось X, сонаправленную со скоростью прямолинейно движущегося автомобиля, для первых четырёх секунд разгона.

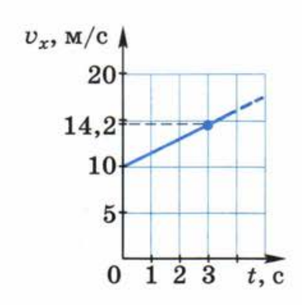


Рис. 11. График функции $v_x = 10 + 1{,}4t$ (м/с)

В этом случае зависимость $v_x(t)$ описывается формулой $v_x = v_{0x} + a_x t$. Найдём по этой формуле координаты двух произвольных точек графика. Например, при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 10$ м/с; при $t = 3$ с $v_x = 10$ м/с $+ 1{,}4$ м/с$^2 \cdot 3$ с $= 14{,}2$ м/с.

График, построенный по этим точкам, представлен на рисунке 11. Он отсекает на оси v_x отрезок, равный проекции вектора начальной скорости.

Построим теперь график зависимости проекции вектора скорости от времени, если начальная скорость не равна нулю, а модуль вектора скорости уменьшается с течением времени.

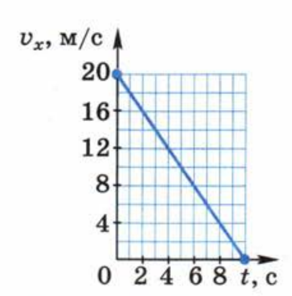


Рис. 12. График функции $v_x = 20 - 2t$ (м/с)

Допустим, водитель автомобиля, движущегося со скоростью 20 м/с (72 км/ч), нажимает на педаль тормоза. В результате автомобиль движется с ускорением 2 м/с^2 и через 10 с останавливается.

За начало отсчёта времени примем момент начала торможения, когда скорость автомобиля ещё была равна 20 м/с.

В этом случае нет необходимости рассчитывать значение проекции вектора скорости, поскольку координаты двух точек графика очевидны: при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 20$ м/с; при $t = 10$ с $v_x = 0$. Соответствующий график представлен на рисунке 12.

Поскольку скорость уменьшается по модулю, то график образует с положительным направлением оси t тупой угол.



1. Запишите формулу, по которой можно рассчитать проекцию вектора мгновенной скорости прямолинейного равноускоренного движения, если известны: а) проекция вектора начальной скорости и проекция вектора ускорения; б) проекция вектора ускорения при том, что начальная скорость равна нулю. **2.** Что представляет собой график проекции вектора скорости равноускоренного движения при начальной скорости: а) равной нулю; б) не равной нулю? **3.** Чем сходны и чем отличаются друг от друга движения, графики которых представлены на рисунках 11 и 12?

УПРАЖНЕНИЕ 6

1. Хоккеист слегка ударил клюшкой по шайбе, придав ей скорость 2 м/с. Чему будет равна скорость шайбы через 4 с после удара, если в результате трения о лёд она движется с ускорением 0,25 м/с^2?

2. Лыжник съезжает с горы из состояния покоя с ускорением, равным 0,2 м/с^2. Через какой промежуток времени его скорость возрастёт до 2 м/с?

3. В одних и тех же координатных осях постройте графики проекции вектора скорости (на ось X, сонаправленную с вектором начальной скорости) при прямолинейном равноускоренном движении для случаев: а) v_{0x} = 1 м/с, a_x = 0,5 м/с^2; б) v_{0x} = 1 м/с, a_x = 1 м/с^2; в) v_{0x} = 2 м/с, a_x = 1 м/с^2.
Масштаб: 1 см — 1 м/с; 1 см — 1 с.

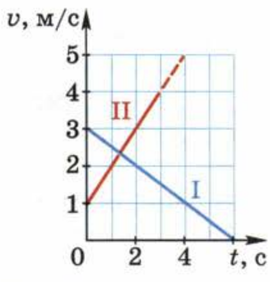


Рис. 13

4. В одних и тех же координатных осях постройте графики проекции вектора скорости (на ось X, сонаправленную с вектором начальной скорости) при прямолинейном равноускоренном движении для случаев: а) v_{0x} = 4,5 м/с, a_x = −1,5 м/с^2; б) v_{0x} = 3 м/с, a_x = −1 м/с^2.

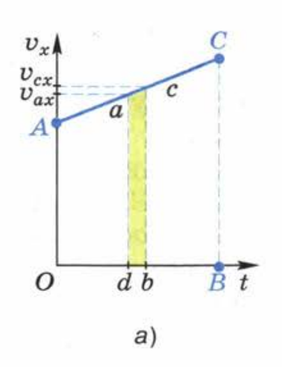
5. На рисунке 13 представлены графики зависимости модуля вектора скорости от времени при прямолинейном движении двух тел. С каким по модулю ускорением движется тело I; тело II?

§ 7 ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЕЛА ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

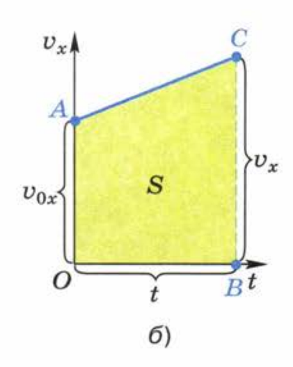
Выведем формулу, с помощью которой можно рассчитать проекцию вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно и равноускоренно, за любой промежуток времени. Для этого обратимся к рисунку 14. Как на рисунке 14, *а*, так и на рисунке 14, *б* отрезок AC представляет собой график проекции вектора скорости тела, движущегося с постоянным ускорением a (при начальной скорости v_0).

Напомним, что при прямолинейном *равномерном* движении тела проекция вектора пе-

Рис. 14. Проекция вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно и равноускоренно, численно равна площади S под графиком



а)



б)

ремещения, совершённого этим телом, определяется по той же формуле, что и площадь прямоугольника, заключённого под графиком проекции вектора скорости (см. рис. 6). Поэтому проекция вектора перемещения численно равна площади этого прямоугольника.

Докажем, что и в случае прямолинейного *равноускоренного* движения проекцию вектора перемещения s_x можно определять по той же формуле, что и площадь фигуры, заключённой между графиком AC, осью Ot и отрезками OA и BC, т. е. что и в этом случае проекция вектора перемещения численно равна площади фигуры под графиком скорости. Для этого на оси Ot (см. рис. 14, *а*) выделим маленький промежуток времени db. Из точек d и b проведём перпендикуляры к оси Ot до их пересечения с графиком проекции вектора скорости в точках a и c.

Таким образом, за промежуток времени, соответствующий отрезку db, скорость тела меняется от v_{ax} до v_{cx}.

За достаточно малый промежуток времени проекция вектора скорости меняется очень незначительно. Поэтому движение тела в течение этого промежутка времени мало отличается от равномерного, т. е. от движения с постоянной скоростью.

В этом случае участок ac графика можно считать горизонтальным, а полоску $acbd$ —

прямоугольником. Значит, площадь этой полоски численно равна проекции вектора перемещения за промежуток времени, соответствующий отрезку db.

На такие полоски можно разбить всю площадь фигуры $OACB$, являющейся трапецией. Следовательно, *проекция вектора перемещения s_x за промежуток времени, соответствующий отрезку OB, численно равна площади S трапеции $OACB$ и определяется по той же формуле, что и эта площадь.*

Согласно правилу, приведённому в школьных курсах геометрии, площадь трапеции равна произведению полусуммы её оснований на высоту. Из рисунка 14, *б* видно, что основаниями трапеции $OACB$ являются отрезки $OA = v_{0x}$ и $BC = v_x$, а высотой — отрезок $OB = t$. Следовательно,

$$S = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t.$$

$$\mathbf{s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}}$$

Поскольку $v_x = v_{0x} + a_x t$, а $S = s_x$, то можно записать:

$$s_x = \frac{v_{0x} + v_{0x} + a_x t}{2} \cdot t = \frac{2v_{0x}t + a_x t^2}{2} = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2},$$

или $$\mathbf{s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}}.$$

Таким образом, мы получили формулу для расчёта проекции вектора перемещения при равноускоренном движении.

По этой же формуле рассчитывают проекцию вектора перемещения и при движении тела с уменьшающейся по модулю скоростью, только в этом случае векторы скорости и ускорения будут направлены в противоположные стороны, поэтому их проекции будут иметь разные знаки.

Вопросы **1.** Пользуясь рисунком 14, *а*, докажите, что проекция вектора перемещения при равноускоренном движении численно равна площади фигуры *OACB*. **2.** Запишите уравнение для определения проекции вектора перемещения тела при его прямолинейном равноускоренном движении.

УПРАЖНЕНИЕ 7

1. Велосипедист съехал с горки за 5 с, двигаясь с постоянным ускорением 0,5 м/с^2. Определите длину горки, если известно, что в начале спуска скорость велосипедиста была равна 18 км/ч.

2. Поезд, идущий со скоростью 15 м/с, остановился через 20 с после начала торможения. Считая, что торможение происходило с постоянным ускорением, определите перемещение поезда за 20 с.

3*[1]. Приведите формулу $S = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t$ к виду $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$. При необходимости воспользуйтесь указаниями в ответах.

§ 8 ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЕЛА ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ БЕЗ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Рассмотрим, как рассчитывается проекция вектора перемещения тела, движущегося равноускоренно, если его начальная скорость $\vec{v}_0$ равна нулю. В этом случае уравнение

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$

будет выглядеть так:

$$s_x = \frac{a_x t^2}{2}.$$

Перепишем это уравнение, подставив в него вместо проекций s_x и a_x модули s и a векторов

[1] Звёздочкой обозначены задачи повышенной сложности.

перемещения и ускорения. Поскольку в данном случае векторы $\vec{s}$ и $\vec{a}$ направлены в одну сторону, их проекции имеют одинаковые знаки. Поэтому уравнение для модулей векторов можно записать:

$$s = \frac{at^2}{2}.$$

Из этой формулы следует, что при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости модуль вектора перемещения прямо пропорционален квадрату промежутка времени, в течение которого это перемещение было совершено. Это означает, что при увеличении в n раз времени движения (отсчитываемого от момента начала движения) перемещение увеличивается в n^2 раз.

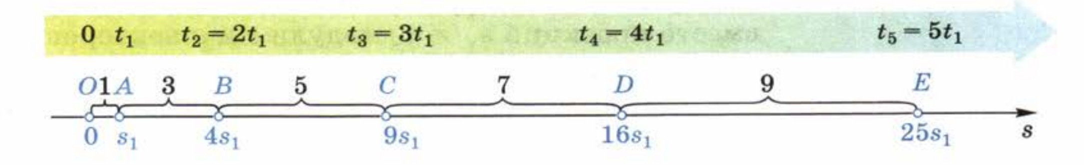
Например, если за произвольный промежуток времени t_1 от начала движения тело совершило перемещение $s_1 = \frac{a}{2}t_1^2$, то за промежуток времени $t_2 = 2t_1$ (отсчитываемый от того же момента, что и t_1) оно совершит перемещение $s_2 = \frac{a}{2} \cdot 4t_1^2 = 4s_1$; за промежуток времени $t_3 = 3t_1$ — перемещение $s_3 = \frac{a}{2} \cdot 9t_1^2 = 9s_1$, за промежуток времени $t_n = nt_1$ — перемещение $s_n = n^2 s_1$ (где n — натуральное число).

Эта зависимость модуля вектора перемещения от времени при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости наглядно отражена на рисунке 15, где отрезки

Рис. 15. Закономерности равноускоренного движения:

$OA : OB : OC : OD : OE = 1 : 4 : 9 : 16 : 25$;

$OA : AB : BC : CD : DE = 1 : 3 : 5 : 7 : 9$



OA, OB, OC, OD и OE представляют собой модули векторов перемещений (s_1, s_2, s_3, s_4 и s_5), совершённых телом соответственно за промежутки времени t_1, $t_2 = 2t_1$, $t_3 = 3t_1$, $t_4 = 4t_1$ и $t_5 = 5t_1$.

Из этого рисунка видно, что

$$OA : OB : OC : OD : OE = 1 : 4 : 9 : 16 : 25, \quad (1)$$

т. е. *при увеличении промежутков времени, отсчитываемых от начала движения, в целое число раз по сравнению с t_1, модули соответствующих векторов перемещений возрастают как ряд квадратов последовательных натуральных чисел.*

Из рисунка 15 видна ещё одна закономерность:

$$OA : AB : BC : CD : DE = 1 : 3 : 5 : 7 : 9, \quad (2)$$

т. е. *модули векторов перемещений, совершаемых телом за последовательные равные промежутки времени (каждый из которых равен t_1), относятся как ряд последовательных нечётных чисел.*



Движение улитки можно считать равноускоренным

Закономерности (1) и (2) присущи только равноускоренному движению. Поэтому ими можно пользоваться, если необходимо определить, является движение равноускоренным или нет.

Определим, например, было ли равноускоренным движение улитки, которая за первые 20 с движения переместилась на 0,5 см, за вторые 20 с — на 1,5 см, за третьи 20 с — на 2,5 см.

Для этого найдём, во сколько раз перемещения, совершённые за второй и третий промежутки времени, больше, чем за первый:

$$\frac{1{,}5\ \text{см}}{0{,}5\ \text{см}} = 3, \quad \frac{2{,}5\ \text{см}}{0{,}5\ \text{см}} = 5.$$

Значит, 0,5 см : 1,5 см : 2,5 см = 1 : 3 : 5. Поскольку эти отношения представляют собой ряд последовательных нечётных чисел, то движение тела было равноускоренным.

В данном случае равноускоренный характер движения был выявлен на основании закономерности (2).



1. По каким формулам рассчитываются проекция и модуль вектора перемещения тела при его равноускоренном движении из состояния покоя? **2.** Во сколько раз увеличится модуль вектора перемещения тела при увеличении времени его движения из состояния покоя в n раз? **3.** Запишите, как относятся друг к другу модули векторов перемещений тела, движущегося равноускоренно из состояния покоя, при увеличении времени его движения в целое число раз по сравнению с t_1. **4.** Запишите, как относятся друг к другу модули векторов перемещений, совершаемых телом за последовательные равные промежутки времени, если это тело движется равноускоренно из состояния покоя. **5.** С какой целью можно использовать закономерности (1) и (2)?

УПРАЖНЕНИЕ 8

1. Отходящий от станции поезд в течение первых 20 с движется прямолинейно и равноускоренно. Известно, что за третью секунду от начала движения поезд прошёл 2 м. Определите модуль вектора перемещения, совершённого поездом за первую секунду, и модуль вектора ускорения, с которым он двигался.

2*. Автомобиль, двигаясь равноускоренно из состояния покоя, за пятую секунду разгона проходит 6,3 м. Какую скорость развил автомобиль к концу пятой секунды от начала движения?

3*. Некоторое тело за первые 0,03 с движения без начальной скорости переместилось на 2 мм, за первые 0,06 с — на 8 мм, за первые 0,09 с — на 18 мм. На основании закономерности (1) докажите, что в течение всех 0,09 с тело двигалось равноускоренно.

§ 9 ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

В курсе физики 7 класса упоминалось об относительности механического движения. Рассмотрим этот вопрос более подробно на

$\upsilon_{\text{чел. отн. зем}} = 19$ м/с

$\upsilon_{\text{чел. отн. вагона}} = 1$ м/с

$\upsilon_{\text{ваг. отн. зем}} = 20$ м/с

Рис. 16. Скорость движения человека относительно вагона и относительно земли различна по модулю и направлению

примерах и сформулируем, в чём конкретно заключается относительность движения.

Человек идёт по вагону против движения поезда (рис. 16). Скорость поезда относительно поверхности земли равна 20 м/с, а скорость человека относительно вагона равна 1 м/с. Определим, с какой скоростью и в каком направлении движется человек относительно поверхности земли.

Будем рассуждать так. Если бы человек не шёл по вагону, то за 1 с он переместился бы вместе с поездом на расстояние, равное 20 м. Но за это же время он прошёл расстояние, равное 1 м, против хода поезда. Поэтому за время, равное 1 с, он сместился относительно поверхности земли только на 19 м в направлении движения поезда. Значит, скорость человека относительно поверхности земли равна 19 м/с и направлена в ту же сторону, что и скорость поезда. Таким образом, в системе отсчёта, связанной с поездом, человек движется со скоростью 1 м/с, а в системе отсчёта, связанной с каким-либо телом на поверхности земли, — со скоростью 19 м/с, причём направлены эти скорости в противоположные стороны. Отсюда следует, что *скорость относительна*, т. е. *скорость одного и того же тела в разных системах отсчёта может быть различной как по числовому значению, так и по направлению.*

Теперь обратимся к другому примеру. Представьте вертолёт, вертикально опускающийся

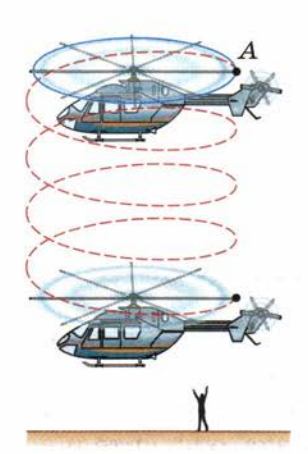


Рис. 17. Относительность траектории и пути

на землю. Относительно вертолёта любая точка винта, например точка A (рис. 17), будет всё время двигаться по окружности, которая на рисунке изображена сплошной линией. Для наблюдателя, находящегося на земле, та же самая точка будет двигаться по винтовой траектории (штриховая линия). Из этого примера ясно, что *траектория движения тоже относительна*, т. е. *траектория движения одного и того же тела может быть различной в разных системах отсчёта*.

Следовательно, *путь является величиной относительной*, так как он равен сумме длин всех участков траектории, пройденных телом за рассматриваемый промежуток времени. Это особенно наглядно проявляется в тех случаях, когда физическое тело движется в одной системе отсчёта и покоится в другой. Например, человек, сидящий в движущемся поезде, проходит определённый путь s в системе, связанной с землёй, а в системе отсчёта, связанной с поездом, его путь равен нулю.

Таким образом, **относительность движения проявляется в том, что скорость, траектория, путь и некоторые другие характеристики дви-**



Вращение звёздного неба в течение ночи

жения относительны, т. е. они могут быть различны в разных системах отсчёта.



Геоцентрическая система мира Клавдия Птолемея

Понимание того, что движение одного и того же тела можно рассматривать в разных системах отсчёта, сыграло огромную роль в развитии взглядов на строение Вселенной.

С давних пор люди замечали, что звёзды в течение ночи, так же как и Солнце днём, перемещаются по небу с востока на запад, двигаясь по дугам и делая за сутки полный оборот вокруг Земли. Поэтому в течение многих столетий считалось, что в центре мира находится неподвижная Земля, а вокруг неё обращаются все небесные тела. Такая система мира была названа ***геоцентрической*** (греческое слово «гео» означает «земля»).

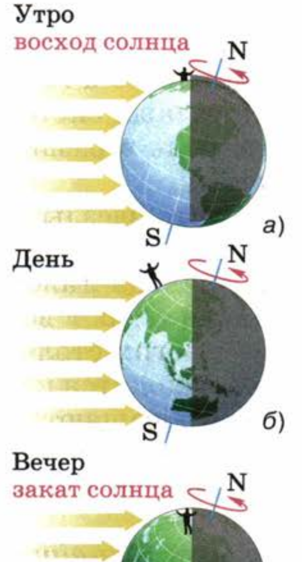
Во II в. александрийский учёный ***Клавдий Птолемей*** обобщил имеющиеся сведения о движении светил и планет в геоцентрической системе и сумел составить довольно точные таблицы, позволяющие определять положение небесных тел в прошлом и будущем, предсказывать наступление затмений и т. д.

Однако со временем, когда точность астрономических наблюдений возросла, стали обнаруживаться расхождения между вычисленными и наблюдаемыми положениями планет. Вносимые при этом исправления делали теорию Птолемея очень сложной и запутанной. Появилась необходимость замены геоцентрической системы мира.



Гелиоцентрическая система мира по Копернику

Новые взгляды на строение Вселенной были подробно изложены в XVI в. польским учёным ***Николаем Коперником***. Он считал, что Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца, одновременно вращаясь вокруг своих осей. Такая система мира называется ***гелиоцентрической***, поскольку в ней за центр Вселенной принимается Солнце (по-гречески «гелиос»).



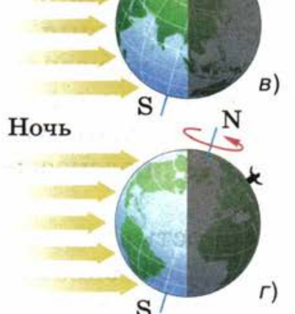


Рис. 18. В гелиоцентрической системе мира видимое движение по небу Солнца днём и звёзд ночью объясняется вращением Земли вокруг своей оси

Таким образом, в гелиоцентрической системе отсчёта движение небесных тел рассматривается относительно Солнца, а в геоцентрической — относительно Земли.

Как же с помощью системы мира Коперника можно объяснить видимое нами суточное обращение Солнца вокруг Земли? На рисунке 18 схематично изображён земной шар, освещаемый с одной стороны солнечными лучами, и человек (наблюдатель), который в течение суток находится в одном и том же месте Земли. Вращаясь вместе с Землёй, он наблюдает за перемещением светил.

Воображаемая ось, вокруг которой вращается Земля, как бы пронзает земной шар, проходя через Северный (N) и Южный (S) географические полюсы. Стрелочка указывает направление вращения Земли — с запада на восток.

На рисунке 18, *а* земной шар изображён в тот момент времени, когда он как бы вывозит наблюдателя с тёмной ночной стороны на освещённую Солнцем, дневную. Но наблюдатель, вращаясь вместе с Землёй относительно её оси с запада на восток со скоростью, приблизительно равной 200 м/с[1], тем не менее не ощущает этого движения, как не ощущаем его мы с вами. Поэтому ему кажется, что Солнце обращается вокруг Земли, поднимаясь из-за горизонта, перемещается в течение дня (рис. 18, *б*) с востока на запад, а вечером уходит за горизонт (рис. 18, *в*). Затем наблюдатель видит перемещение звёзд с востока на запад в течение ночи (рис. 18, *г*).

Итак, по системе мира Коперника видимое вращение Солнца и звёзд, т. е. смена дня и ночи, объясняется вращением Земли вокруг сво-

---

[1] Скорость вращения точек поверхности Земли относительно оси зависит от широты местности: она возрастает от нуля (на полюсах) до 465 м/с (на экваторе).

ей оси. Время, за которое земной шар делает полный оборот, называется ***сутками***.

Гелиоцентрическая система мира оказалась гораздо более удачной, чем геоцентрическая, при решении многих научных и практических задач.

Таким образом, применение знаний об относительности движения позволило по-новому взглянуть на строение Вселенной. А это, в свою очередь, помогло впоследствии открыть физические законы, описывающие движение тел в Солнечной системе и объясняющие причины такого движения.



1. В чём проявляется относительность движения? Ответ проиллюстрируйте примерами. 2. В чём основное отличие гелиоцентрической системы мира от геоцентрической? 3. Объясните смену дня и ночи на Земле в гелиоцентрической системе (см. рис. 18).

УПРАЖНЕНИЕ 9

1. Вода в реке движется со скоростью 2 м/с относительно берега. По реке плывёт плот. Какова скорость плота относительно берега; относительно воды в реке?

2. В некоторых случаях скорость тела может быть одинаковой в разных системах отсчёта. Например, поезд движется с одной и той же скоростью в системе отсчёта, связанной со зданием вокзала, и в системе отсчёта, связанной с растущим у дороги деревом. Не противоречит ли это утверждению о том, что скорость относительна? Ответ поясните.

3. При каком условии скорость движущегося тела будет одинакова относительно двух систем отсчёта?

4. Благодаря суточному вращению Земли человек, сидящий на стуле в своём доме в Москве, движется относительно земной оси со скоростью примерно 900 км/ч. Сравните эту скорость с начальной скоростью пули относительно пистолета, которая равна 250 м/с.

5*. Торпедный катер идёт вдоль шестидесятой параллели южной широты со скоростью 90 км/ч по отношению к суше. Скорость суточного вращения Земли на этой широте равна 223 м/с. Чему равна (в СИ) и куда направлена скорость катера относительно земной оси, если он движется на восток; на запад?

§ 10 ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Вам уже известен закон инерции. Согласно этому закону тела (материальные точки) находятся в покое или движутся прямолинейно и равномерно (т. е. сохраняют свою скорость неизменной), если на них не действуют другие тела.

Суть закона инерции впервые была изложена в одной из книг итальянского учёного ***Галилео Галилея***, опубликованной в начале XVII в.

До этого на протяжении многих веков в науке господствовала точка зрения древнегреческого учёного ***Аристотеля*** и его последователей. Согласно взглядам Аристотеля, при отсутствии внешнего воздействия тело может только покоиться, а для того, чтобы тело двигалось с постоянной скоростью, нужно, чтобы на него непрерывно действовало другое тело.



ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЙ

(1564—1642)

Итальянский физик, механик, астроном, философ и математик. Основатель экспериментальной физики. Первым использовал телескоп для наблюдения небесных тел и сделал ряд выдающихся астрономических открытий

Галилей пришёл к выводу о том, что при отсутствии внешних воздействий тело может не только покоиться, но и двигаться прямолинейно и равномерно. А сила, которую приходится прикладывать к телу для поддержания его движения, необходима только для того, чтобы уравновесить другие приложенные к телу силы, например силу трения.

Подобные взгляды на причины движения высказывались некоторыми учёными и до Галилея. Галилей, критически проанализировав идеи своих предшественников, пришёл к правильным выводам и применил их для объяснения конкретных явлений, тем самым дав толчок развитию науки.



ИСААК НЬЮТОН

(1643—1727)

Английский физик, математик и астроном. Сформулировал три закона динамики, открыл закон всемирного тяготения и явление дисперсии света

В конце XVII в. английский учёный ***Исаак Ньютон*** обобщил выводы Галилея, сформулировал закон инерции и включил его в качестве первого из трёх законов в основу механики (науки о движении и взаимодействии тел). Поэтому этот закон называют ***первым законом Ньютона***.

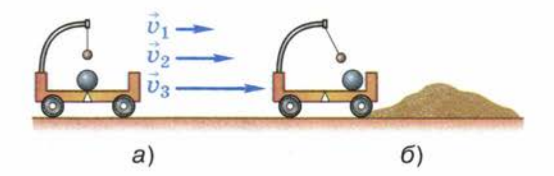
В изложении Ньютона закон инерции читается так: «Всякое тело продолжает удерживаться в своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние».

Однако со временем выяснилось, что первый закон Ньютона выполняется не во всех системах отсчёта.

В этом можно убедиться с помощью опыта, изображённого на рисунке 19. Сначала тележка движется прямолинейно и равномерно относительно земли (рис. 19, *а*). На ней находятся два шарика, один из которых лежит на горизонтальной поверхности, а другой подвешен на нити. Силы, действующие на каждый из шариков по вертикали, уравновешены, по горизонтали никакие силы на них не действуют (силу сопротивления воздуха в данном случае можно не учитывать).

Шарики будут находиться в покое относительно тележки при любой скорости её движения (v_1, v_2, v_3 и т. д.) относительно земли — главное, чтобы эта скорость была постоянна.

Но когда тележка попадает на песочную насыпь (рис. 19, *б*), её скорость быстро уменьшается, в результате чего тележка останавливается. Во время торможения тележки оба



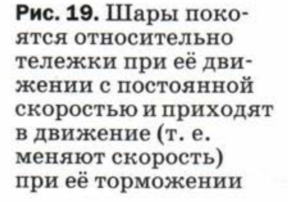


Рис. 19. Шары покоятся относительно тележки при её движении с постоянной скоростью и приходят в движение (т. е. меняют скорость) при её торможении

шарика приходят в движение, т. е. изменяют свою скорость относительно тележки, хотя нет никаких сил, которые толкали бы их.

Значит, в системе отсчёта, связанной с тележкой, тормозящей относительно земли, закон инерции не выполняется.

Таким образом, к формулировке закона инерции, данной Ньютоном, следует добавить, что этот закон справедлив не для всех систем отсчёта. Без такого указания эта формулировка является незавершённой и даже не совсем точной (так как может привести к неверному представлению о том, что закон инерции выполняется в любых системах отсчёта). Поэтому с точки зрения современных представлений *первый закон Ньютона* формулируется так:

существуют такие системы отсчёта, относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела или действия других тел компенсируются.

Следует помнить, что в первом законе Ньютона речь идёт о телах, которые могут быть приняты за материальные точки.

Те системы отсчёта, в которых закон инерции выполняется, называются ***инерциальными***, а те, в которых не выполняется, — ***неинерциальными***.

Законы движения и взаимодействия тел, которые вам предстоит изучить в 9 классе, сформулированы для инерциальных систем отсчёта. В инерциальных системах отсчёта эти законы имеют наиболее простой вид. Поэтому, прежде чем применять тот или иной закон для решения задачи, нужно выбрать систему отсчёта, которую можно считать инерциальной.

Следует отметить, однако, что невозможно найти такую систему отсчёта, которая для любых рассматриваемых в ней явлений была бы строго инерциальной.

С очень высокой степенью точности инерциальной можно считать гелиоцентрическую

Солнечная (гелиоцентрическая) система — инерциальная система отсчёта

систему. Эта система используется в задачах небесной механики и космонавтики.

Инерциальными можно считать также системы отсчёта, связанные с любым телом, которое покоится или движется равномерно и прямолинейно относительно поверхности земли.

Системы отсчёта, движущиеся относительно инерциальных с ускорением, являются неинерциальными.

Существует бесчисленное множество как инерциальных, так и неинерциальных систем отсчёта.



1. Как движется тело, если на него не действуют другие тела? **2.** Чем отличаются взгляды Галилея от взглядов Аристотеля в вопросе об условиях равномерного движения тел? **3.** Как проводился опыт, изображённый на рисунке 19, и какие выводы из него следуют? **4.** Дайте современную формулировку первого закона Ньютона. **5.** Какие системы отсчёта называются инерциальными, а какие — неинерциальными? Приведите примеры.

УПРАЖНЕНИЕ 10

На столе в равномерно и прямолинейно движущемся поезде стоит легкоподвижный игрушечный автомобиль. При торможении поезда автомобиль без внешнего воздействия покатился вперёд, сохраняя свою скорость относительно земли.

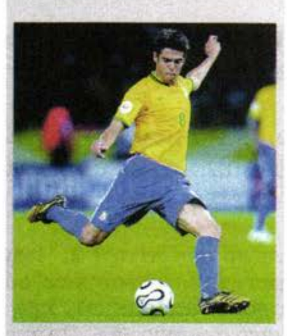
Выполняется ли закон инерции: а) в системе отсчёта, связанной с землёй; б) в системе отсчёта, связанной с поездом, во время его прямолинейного и равномерного движения; во время торможения?

Можно ли в описанном случае считать инерциальной систему отсчёта, связанную с землёй; с поездом?

§ 11 ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА



Лыжник движется с ускорением, так как $F \neq 0$



Чем сильнее футболист бьёт по мячу, тем дальше он полетит

Из курса физики 7 класса вам известно, что причиной изменения скорости тела, а значит, и *причиной возникновения ускорения является действие на это тело других тел с некоторой силой*.

Когда на тело действует сразу несколько сил, то оно движется с ускорением, если равнодействующая F этих сил не равна нулю. Напомним, что равнодействующей нескольких сил, одновременно приложенных к телу, называется сила, производящая на тело такое же действие, как все эти силы вместе.

Поскольку ускорение возникает в результате действия силы, то естественно предположить, что существует количественная взаимосвязь между этими величинами.

Жизненный опыт убеждает нас в том, что чем больше будет равнодействующая приложенных к телу сил, тем большее ускорение получит при этом тело. Например, чем сильнее футболист бьёт ногой по лежащему на поле мячу, тем большее ускорение приобретает при этом мяч и тем бóльшую скорость он успевает набрать за те доли секунды, пока взаимодействует с ногой футболиста (о приобретённой мя-

чом скорости можно судить по тому, насколько далеко он отлетает после удара).

Многочисленные наблюдения и опыты свидетельствуют также о том, что ускорения, получаемые телами, зависят от массы этих тел.

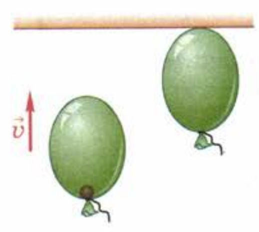


Рис. 20. Опыт, свидетельствующий о том, что ускорение, получаемое телом, зависит от массы тела

Чтобы в этом удостовериться, проделаем опыт. Возьмём два одинаковых воздушных шарика. В один из них вложим маленькую бусинку такого веса, чтобы шарик вместе с бусинкой мог взлететь. Наполним оба шарика гелием до одного и того же объёма. Расположим шарики на одной и той же высоте (ближе к полу) и отпустим. Мы увидим, что шарик с бусинкой достигнет потолка позже (рис. 20). Значит, под действием одной и той же равнодействующей силы F, равной разности действующих на шарики архимедовой силы и силы сопротивления воздуха ($F = F_A - F_{сопр}$), шарик без груза получил большее ускорение. О величине его ускорения можно судить по тому, что одно и то же расстояние — от места старта до потолка — он прошёл за меньший промежуток времени, чем шарик с бусинкой, масса которого больше. Значит, его скорость росла быстрее, что свидетельствует о большем ускорении движения.

Для подтверждения того, что при данной силе получаемое телом ускорение зависит от массы этого тела, рассмотрим ещё один опыт.

На рисунке 21, *а* изображена легкоподвижная тележка с укреплёнными на ней маленькой капельницей и двумя одинаковыми лёгкими вентиляторами (работающими от находящейся внутри каждого из них батарейки одной и той же мощности). Допустим, масса тележки вместе с капельницей и вентиляторами нам известна.

К тележке привязан один из концов нити, перекинутой через блок. К другому концу нити прикреплён небольшой груз. Этот груз нужен

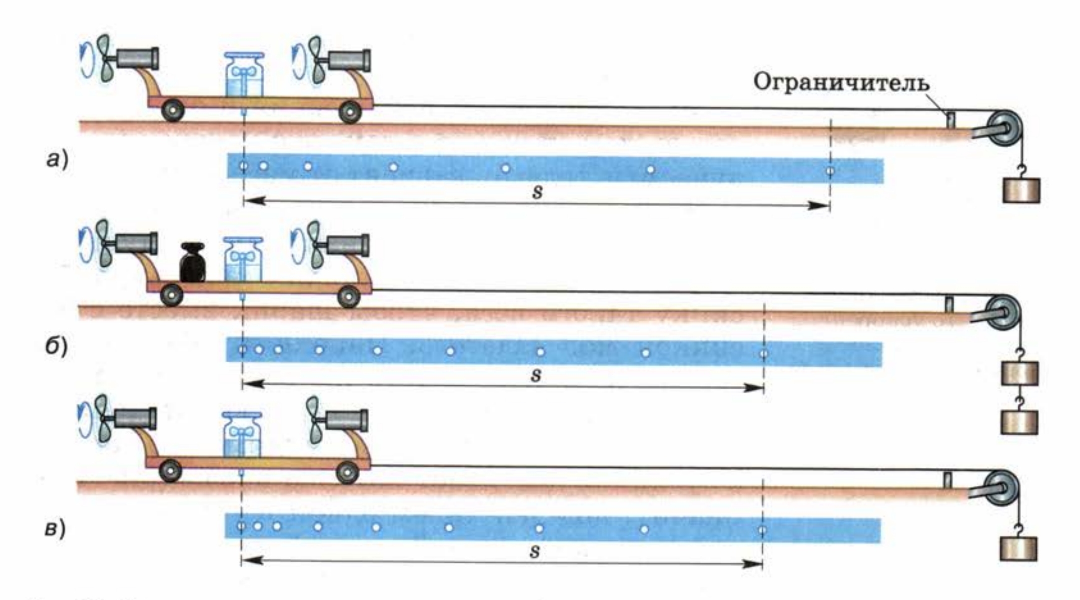


Рис. 21. Демонстрация второго закона Ньютона

для того, чтобы скомпенсировать силу трения, действующую на движущуюся тележку.

Вдоль траектории движения тележки расположим бумажную ленту. Откроем кран и включим вентиляторы. В результате взаимодействия их винтов с воздухом вентиляторы будут толкать тележку с некоторой постоянной силой по направлению к ограничителю на краю стола. При этом на бумажной ленте будут оставаться следы капель, падающих через равные промежутки времени T.

После того как тележка остановится, выключим вентиляторы. Измерив расстояния между соседними метками на ленте, можно убедиться в том, что эти расстояния относятся как ряд нечётных последовательных чисел (1 : 3 : 5 : 7 : 9...). Значит, под действием постоянной силы тележка двигалась равноускоренно.

Чтобы определить ускорение движения тележки, измерим модуль (s) вектора её перемещения (т. е. расстояние между крайними метками на ленте). Затем посчитаем число (n)

промежутков между соседними метками на ленте, или, что то же самое, число промежутков времени T за время движения тележки. По формуле $t = Tn$ вычислим промежуток времени t, за который тележка переместилась на расстояние s. Из формулы $s = \frac{at^2}{2}$ выразим модуль ускорения $\left(a = \frac{2s}{t^2}\right)$ и рассчитаем его.

Теперь удвоим массу всей движущейся системы (состоящей из тележки с вентиляторами и капельницей и груза на нити) с помощью гирь, как показано на рисунке 21, *б* (при этом одна гирька добавляется к уже имеющемуся грузу на конце нити для компенсации возросшей силы трения).

Повторим опыт. Определив ускорение и сравнив его с ускорением в предыдущем опыте, можно убедиться в том, что при действии одной и той же силы система тел, масса которой стала вдвое больше, приобрела в 2 раза меньшее ускорение, т. е. $\frac{a}{2}$.

Из рассмотренного опыта и ряда подобных следует, что *ускорения, сообщаемые телам одной и той же постоянной силой, обратно пропорциональны массам этих тел*.

С помощью этой же экспериментальной установки можно провести опыт, позволяющий установить количественную взаимосвязь между ускорением и силой, сообщающей телу это ускорение.

Для этого снимем добавленные в предыдущем опыте гири, чтобы масса системы опять стала такой, как в первом опыте (рис. 21, *в*). Но теперь приведём тележку в движение, включив только один вентилятор, в результате чего на тележку будет действовать в 2 раза меньшая сила, чем при двух включённых вентиляторах (придававших тележке ускорение a).

Как показывают измерения и вычисления, при уменьшении силы в 2 раза ускорение тоже уменьшается в 2 раза, т. е. становится равным $\frac{a}{2}$ (при неизменной массе тележки).

Значит, *ускорение, с которым движется тело постоянной массы, прямо пропорционально приложенной к этому телу силе, в результате которой возникает ускорение.*

Количественная взаимосвязь между массой тела, ускорением, с которым оно движется, и равнодействующей приложенных к телу сил, вызывающих это ускорение, называется ***вторым законом Ньютона***. Он формулируется так:

ускорение тела прямо пропорционально равнодействующей сил, приложенных к телу, и обратно пропорционально его массе.

Следует помнить, что во втором законе Ньютона, так же как и в первом, под телом подразумевается материальная точка, движение которой рассматривается в инерциальной системе отсчёта.

$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$

Математически второй закон Ньютона записывается так:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Из формулы следует, что вектор ускорения совпадает по направлению с вектором равнодействующей приложенных к телу сил.

В скалярном виде второй закон Ньютона можно записать:

$$a_x = \frac{F_x}{m},$$

или

$$a = \frac{F}{m},$$

где a_x и F_x — проекции векторов ускорения и силы на ось X, а a и F — модули этих векторов.

Вам уже известно, что сила измеряется в *ньютонах* **(Н)**.

Покажем, как с помощью второго закона Ньютона даётся определение единицы силы — 1 Н. Для этого выразим модуль силы:

$$F = ma.$$

В соответствии с этой формулой сила равна единице (1 Н), если масса равна единице (1 кг) и ускорение равно единице (1 м/с^2).

В СИ за единицу силы принимается сила, сообщающая телу массой 1 кг *ускорение* 1 м/с^2 *в направлении действия силы.*

Получим соотношение между единицами силы, массы и ускорения:

$$1\ \text{Н} = 1\ \text{кг} \cdot 1\ \text{м/с}^2 = 1\ \text{кг} \cdot \text{м/с}^2.$$



1. Что является причиной ускоренного движения тел? **2.** Приведите примеры из жизни, свидетельствующие о том, что чем больше приложенная к телу сила, тем больше сообщаемое этой силой ускорение. **3.** Используя рисунки 20 и 21, расскажите о ходе опытов и выводах, следующих из этих опытов. **4.** Сформулируйте второй закон Ньютона. Какой математической формулой он выражается? **5.** Что можно сказать о направлении вектора ускорения и вектора равнодействующей приложенных к телу сил?

УПРАЖНЕНИЕ 11

1. Определите силу, под действием которой велосипедист скатывается с горки с ускорением, равным 0,8 м/с^2, если масса велосипедиста вместе с велосипедом равна 50 кг.

2. Через 20 с после начала движения электровоз развил скорость 4 м/с. Найдите силу, сообщающую ускорение, если масса электровоза равна 184 т.

3. Два тела равной массы движутся с ускорениями 0,08 и 0,64 м/с^2 соответственно. Равны ли модули действующих на тела сил? Чему равна сила, действующая на второе тело, если на первое действует сила 1,2 Н?

4. С каким ускорением будет всплывать находящийся под водой мяч массой 0,5 кг, если действующая на него сила тяжести равна 5 Н, архимедова сила — 10 Н, а средняя сила сопротивления движению — 2 Н?

5. Баскетбольный мяч, пройдя сквозь кольцо и сетку, под действием силы тяжести сначала движется вниз с возрастающей скоростью, а после удара о пол — вверх с уменьшающейся скоростью. Как направлены векторы ускорения, скорости и перемещения мяча по отношению к силе тяжести при его движении вниз; вверх?

6. Тело движется прямолинейно с постоянным ускорением. Какая величина, характеризующая движение этого тела, всегда сонаправлена с равнодействующей приложенных к телу сил, а какие величины могут быть направлены противоположно равнодействующей?

§ 12 ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

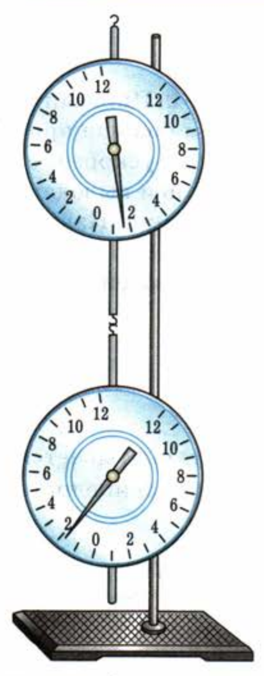


Рис. 22. Сцепленные динамометры показывают одинаковые по модулю силы

Вы знаете, что не бывает одностороннего действия одного тела на другое, тела всегда взаимодействуют друг с другом. Например, во время забивания гвоздя не только молоток действует на гвоздь, но и гвоздь, в свою очередь, действует на молоток, в результате чего молоток останавливается.

Что можно сказать о силах, с которыми два тела действуют друг на друга?

Для ответа на этот вопрос проделаем такие опыты.

К укреплённому на штативе демонстрационному динамометру подвесим второй такой же динамометр. При этом стрелки приборов отклонятся в противоположные стороны, но их показания будут одинаковы (рис. 22). Следовательно, динамометры взаимодействуют равными по модулю и противоположно направленными силами.

Тела действуют друг на друга с равными по модулю силами и в том случае, если взаимодействие происходит на расстоянии. Опыт,

доказывающий это, изображён на рисунке 23. На стержни динамометров надеты круглые столики, к которым клейкой лентой прикреплены плоские керамические магниты. Магниты отталкиваются, поскольку обращены друг к другу одноимёнными полюсами.

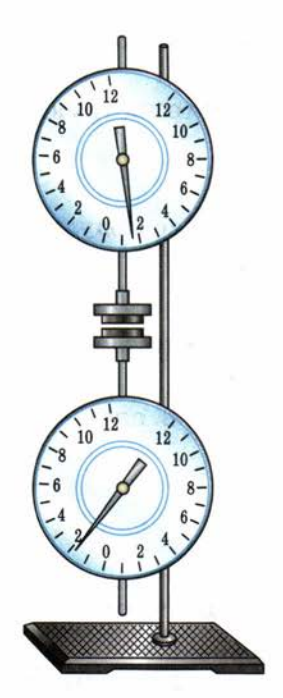


Рис. 23. Взаимодействие магнитов на расстоянии

До начала опыта динамометры были разведены на такое расстояние, при котором силы взаимодействия магнитов были практически равны нулю и не регистрировались динамометрами.

Когда один из динамометров стали приближать к другому, их стрелки начали отклоняться от нуля в разные стороны. Это означает, что силы, с которыми магниты действуют друг на друга, противоположны по направлению.

При сближении магнитов показания динамометров возрастают, но в каждый момент они равны друг другу — значит, магниты отталкиваются с равными по модулю силами.

Теперь рассмотрим опыт, в котором силы взаимодействия измеряются в процессе движения взаимодействующих тел. На рисунке 24 изображён самодвижущийся игрушечный трактор, который тянет на буксире металлическую коробку с грузом. В качестве буксирного троса использованы сцепленные друг с другом трубчатые динамометры, один из которых прикреплён к трактору, а второй — к коробке. Показания динамометров одинаковы, значит, движущиеся трактор и коробка

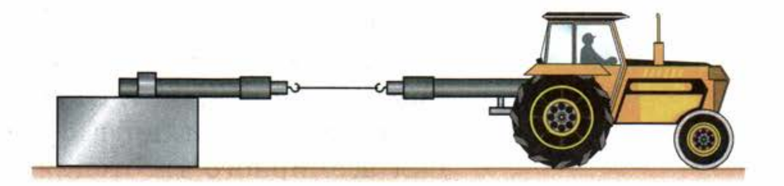


Рис. 24. Взаимодействие движущихся сцепленных тел

действуют друг на друга с равными по модулю силами.

Эти и многие другие опыты свидетельствуют о том, что

силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению.

Этот закон был открыт Ньютоном и называется ***третьим законом Ньютона.***

Математически он записывается в следующем виде:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$

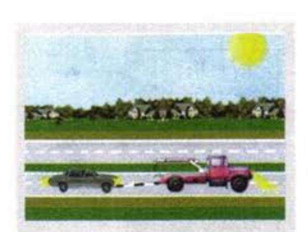
Знак «минус» показывает, что векторы сил направлены в разные стороны.

Любое из наблюдаемых нами движений различных тел можно объяснить с помощью законов Ньютона.

Например, идущий человек движется вперёд благодаря тому, что он отталкивается ногами от земли, т. е. взаимодействует с ней. Человек и земля действуют друг на друга с одинаковыми по модулю и противоположно направленными силами и получают ускорения, обратно пропорциональные их массам. Поскольку масса Земли огромна по сравнению с массой человека, то ускорение Земли практически равно нулю, т. е. она не меняет свою скорость. Человек же приходит в движение относительно Земли.

Следует отметить, что силы, возникающие в результате взаимодействия тел, являются силами одной природы. Например, Земля и Луна взаимодействуют друг с другом посредством сил всемирного тяготения, стальной гвоздь и

магнит притягиваются благодаря действию магнитных сил.


Силы, действующие на легковой и грузовой автомобили, не уравновешивают друг друга, так как они приложены к разным телам

Вы уже знаете, что под действием притяжения к Земле предметы, лежащие на опоре, немного сжимаются сами и сжимают находящуюся под ними опору (обычно эти деформации так малы, что мы не замечаем их). В результате и в самих телах, и в опоре возникают силы упругости, посредством которых тело и опора взаимодействуют друг с другом.

Силу, приложенную к опоре и направленную вертикально вниз, называют *весом тела* $\vec{P}$, а силу, приложенную к телу и направленную вертикально вверх, — *силой реакции опоры* $\vec{N}$. Как уже отмечалось, обе эти силы являются силами упругости.

Следует помнить, что *силы, о которых говорится в третьем законе Ньютона, никогда не уравновешивают друг друга, поскольку они приложены к разным телам.* (Две равные по модулю и противоположно направленные силы уравновешивают друг друга в том случае, если они приложены к одному телу. Тогда их равнодействующая равна нулю, и тело при этом находится в равновесии, т. е. либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.)


Катер находится в равновесии, так как $\vec{F}_A = -\vec{F}_{тяж}$

? Вопросы

1. Пользуясь рисунками 22, 23 и 24, расскажите, как проводились изображённые на них опыты и какие выводы были сделаны на основании полученных результатов. **2.** Сформулируйте третий закон Ньютона. Как он записывается математически? **3.** Что можно сказать об ускорении, которое получает Земля при взаимодействии с идущим по ней человеком? Ответ обоснуйте. **4.** Приведите примеры, показывающие, что силы, возникающие в результате взаимодействия двух тел, одинаковы по своей природе. **5.** Почему неверно говорить о равновесии сил, возникающих при взаимодействии тел?

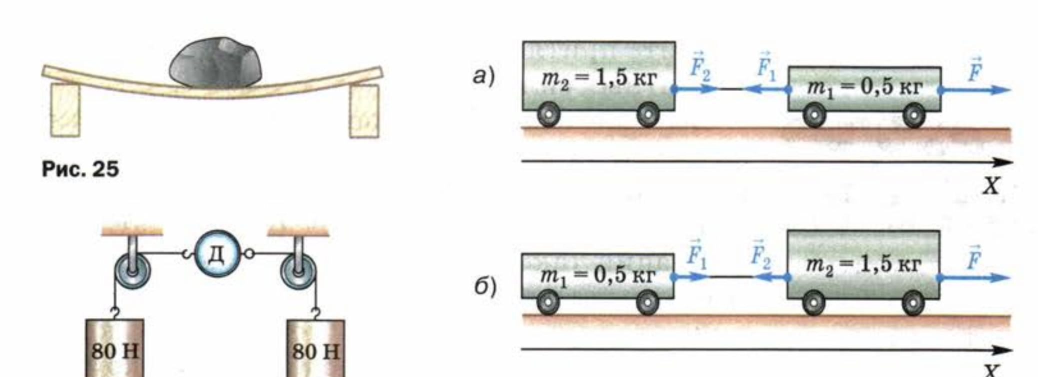


Рис. 25

Рис. 26

Рис. 27



УПРАЖНЕНИЕ 12

1. На рисунке 25 изображён лежащий на доске камень. Сделайте в тетради такой же рисунок и изобразите стрелочками две силы, которые по третьему закону Ньютона равны друг другу. Что это за силы? Обозначьте их.
2. Будет ли превышен предел измерений динамометра Д, изображённого на рисунке 26, если он рассчитан на измерение сил до 100 Н включительно?
3. На рисунке 27, *а* изображены две тележки, соединённые между собой нитью. Под действием некоторой силы F тележки пришли в движение с ускорением $a = 0{,}2$ м/с^2.

   а) Определите проекции на ось X сил $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_1$, с которыми нить действует соответственно на вторую и первую тележки. (Трение не учитывайте.)

   б) Чему будут равны проекции сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, если тележки поменять местами, как показано на рисунке 27, *б*?

   в) В каком из двух случаев, показанных на рисунке 27, нить между тележками натянута сильнее?

   г) Определите проекцию силы $\vec{F}$, под действием которой тележки пришли в движение.

§ 13 СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ

Свободным падением называется движение тел под действием силы тяжести.

Падение тел, наблюдаемое нами в повседневной жизни, строго говоря, не является свободным, поскольку помимо силы тяжести на

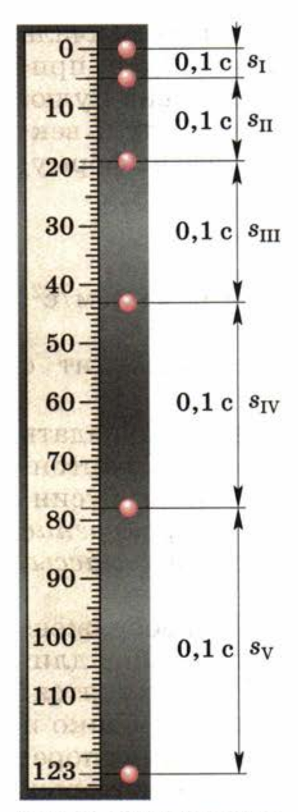


Рис. 28. Равноускоренное движение свободно падающего шарика

тела действует сила сопротивления воздуха. Но если сила сопротивления пренебрежимо мала по сравнению с силой тяжести, то движение тела очень близко к свободному (как, например, при падении маленького тяжёлого гладкого шарика).

Тела падают свободно в безвоздушном пространстве, например внутри сосуда, из которого откачан воздух.

Поскольку сила тяжести, действующая на каждое тело вблизи поверхности земли, постоянна, то *свободно падающее тело должно двигаться с постоянным ускорением, т. е. равноускоренно* (это следует из второго закона Ньютона).

Опыты подтверждают этот вывод. На рисунке 28 показаны положения свободно падающего шарика, который фотографировали через каждые 0,1 с с момента начала движения[1].

Мы знаем, что модули векторов перемещений, совершаемых телом при прямолинейном равноускоренном движении за последовательные равные промежутки времени, относятся как ряд последовательных нечётных чисел. Именно такой ряд и образуют соответствующие перемещения шарика, показанные на рисунке 28:

$$s_I : s_{II} : s_{III} : s_{IV} : s_V \approx$$
$$\approx 4{,}9 \text{ см} : 14{,}1 \text{ см} : 24 \text{ см} : 35 \text{ см} : 45 \text{ см} \approx$$
$$\approx 1 : 3 : 5 : 7 : 9.$$

Таким образом, отношение модулей векторов перемещений, совершённых шариком за последовательные равные промежутки времени, свидетельствует о том, что шарик в свободном падении двигался равноускоренно.



Стробоскоп

[1] Такие фотографии делают стробоскопическим методом. Свободно падающий в темноте шарик освещают кратковременными вспышками света стробоскопа через равные промежутки времени. Положения шарика в моменты вспышек фиксируются на плёнке фотоаппарата, затвор которого открыт в течение всего времени падения шарика.

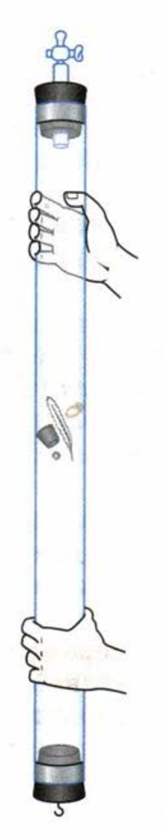


Рис. 29. Не испытывая сопротивления воздуха, все тела в трубке совершают свободное падение

Из рисунка 28 видно, что с момента начала движения шарик прошёл 1,23 м за 0,5 с, причём его начальная скорость была равна нулю. По этим данным можно вычислить модуль вектора ускорения шарика, выразив его из формулы $s = \frac{at^2}{2}$:

$$a = \frac{2s}{t^2} = 2\frac{1{,}23\ \text{м}}{(0{,}5\ \text{с})^2} = \frac{2{,}46\ \text{м}}{0{,}25\ \text{с}^2} = 9{,}84\ \text{м/с}^2 \approx 9{,}8\ \text{м/с}^2.$$

Свободное падение шарика происходит с ускорением 9,8 м/с^2.

А с каким ускорением будут свободно падать другие тела, например кусочек ваты, картонная коробка из-под обуви, деревянная бусинка? Другими словами: *зависит ли ускорение при свободном падении тел от их массы, объёма, формы и т. д.?*

Ответ на этот вопрос даёт опыт, изображённый на рисунке 29. В стеклянной трубке длиной, приблизительно равной 0,8 м, находятся: кусочек пробки, дробинка, птичье пёрышко и монетка. Концы трубки герметично закупорены резиновыми пробками, в одной из которых имеется кран. Откачаем воздух из трубки и закроем кран. При перевёртывании трубки мы видим, что все находящиеся в ней тела одновременно достигают дна. В любой момент времени все эти предметы имеют одинаковые мгновенные скорости, а значит, движутся с одинаковым ускорением, которое называется *ускорением свободного падения* и обозначается буквой g (первой буквой латинского слова gravitas — «тяжесть»).

Ускорение свободного падения — ускорение, с которым движется тело во время свободного падения.

Существуют способы определения числового значения g с большей точностью (например, до 0,00001 м/с^2). Но при решении задач школьно-



Свободное падение спортсменки, совершающей прыжок с вышки в воду

го курса физики, где не требуется высокой точности результата, обычно используют значение 9,8 м/с^2 или даже 10 м/с^2.

Свободное падение описывается теми же формулами, что и любое равноускоренное движение. Например, при падении из состояния покоя проекции векторов скорости и перемещения рассчитываются по формулам $v_x = a_x t$, $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$, если начальная скорость не равна нулю, то $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$ и т. д. Только вместо a_x, обозначающего проекцию произвольного ускорения, ставят g_x, подчёркивая тем самым, что любое свободно падающее тело движется с ускорением свободного падения. Поэтому формулы выглядят так:

$$v_x = g_x t, \quad s_x = \frac{g_x t^2}{2}, \quad s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2g_x}.$$

При движении тела вниз векторы ускорения свободного падения, скорости и перемещения направлены в одну и ту же сторону, поэтому их проекции имеют одинаковые знаки.

Вывод о том, что все тела, независимо от их масс, форм и размеров, совершают свободное падение совершенно одинаково, на первый взгляд может показаться противоречащим нашему повседневному опыту. Мы видим, что тяжёлые тела достигают земли быстрее, чем лёгкие, падающие с той же высоты.

На самом деле никакого противоречия здесь нет. Просто обычно мы наблюдаем падение тел в воздухе, который действует на падающее тело с некоторой силой, оказывая сопротивление движению.

Если рассматривать, например, падение в воздухе маленького тяжёлого шарика (рис. 30, *а*), то силой сопротивления воздуха

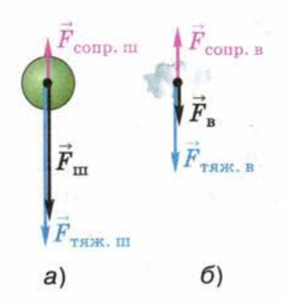
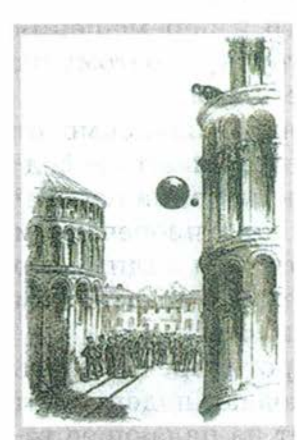


Рис. 30. В воздухе падение шарика допустимо считать свободным, а кусочка ваты — нет

можно пренебречь по сравнению с действующей на шарик силой тяжести и с некоторым приближением считать, что шарик свободно падает. Из рисунка видно, что равнодействующая ($\vec{F}_ш$) сил тяжести и сопротивления воздуха, придающая шарику ускорение, мало отличается от силы тяжести ($\vec{F}_{тяж. ш}$), поэтому шарик движется с ускорением, близким к $\vec{g}$.

Но падение в воздухе кусочка ваты (рис. 30, *б*) никак нельзя считать свободным, так как в этом случае сила сопротивления составляет значительную часть от силы тяжести и равнодействующая сила ($\vec{F}_в$) значительно меньше силы тяжести ($\vec{F}_{тяж. в}$). Поэтому кусочек ваты падает в воздухе с гораздо меньшим ускорением, чем при свободном падении.

К выводу о том, что ускорение свободного падения не зависит от массы тела, первым пришёл Галилей в конце XVI в. Одновременно роняя с башни тяжёлые шары и наблюдая за их падением, он обнаружил, что шары, имея разные массы, достигали земли почти одновременно.



Роняя шары разных масс с Пизанской башни, Галилей доказал независимость ускорения свободного падения от массы падающего тела

Зная, с каким ускорением движется любое тело под действием силы тяжести, согласно второму закону Ньютона, можно записать формулу для нахождения модуля вектора силы тяжести, действующей на тело произвольной массы m:

$$F_{тяж} = 9{,}8 \text{ м/с}^2 \cdot m.$$

Сравнивая эту формулу с той, которая была дана в курсе физики 7 класса:

$$F_{тяж} = 9{,}8 \text{ Н/кг} \cdot m,$$

можно заметить, что они отличаются только единицами при коэффициенте 9,8. Покажем, что Н/кг можно преобразовать в м/с^2.

В § 11 было показано, что 1 Н = 1 кг · м/с^2. Следовательно, 1 Н/кг = 1 $\frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2}{\text{кг}}$ = 1 м/с^2, т. е. 9,8 Н/кг = 9,8 м/с^2.



1. Что называется свободным падением тел? **2.** Как доказать, что свободное падение шарика, изображённого на рисунке 28, было равноускоренным? **3.** С какой целью ставился опыт, изображённый на рисунке 29, и какой вывод из него следует? **4.** Что такое ускорение свободного падения? **5.** Почему в воздухе кусочек ваты падает с меньшим ускорением, чем железный шарик? **6.** Кто первым пришёл к выводу о том, что свободное падение является равноускоренным движением?



УПРАЖНЕНИЕ 13

1. С какой высоты свободно падала сосулька, если расстояние до земли она преодолела за 4 с?
2. Определите время падения монетки, если её выронили из рук на высоте 80 см над землёй. (Принять $g = 10$ м/с^2.)
3. Маленький стальной шарик упал с высоты 45 м. Сколько времени длилось его падение? Какое перемещение совершил шарик за первую и последнюю секунды своего движения? (Принять $g = 10$ м/с^2.)

§ 14 ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ. НЕВЕСОМОСТЬ

Сила тяжести действует на все тела на Земле: покоящиеся и движущиеся, находящиеся на поверхности Земли и вблизи неё.

Тело, свободно падающее на землю, движется равноускоренно с возрастающей скоростью, поскольку его скорость сонаправлена с силой тяжести и ускорением свободного падения.

Тело, подброшенное вверх, при отсутствии сопротивления воздуха тоже движется с постоянным ускорением, вызванным действием силы тяжести. Но в этом случае начальная скорость $\vec{v}_0$, которую телу придали при броске, на-

правлена вверх, т. е. противоположно силе тяжести и ускорению свободного падения. Поэтому скорость тела уменьшается (за каждую секунду — на величину, *численно* равную модулю ускорения свободного падения, т. е. на 9,8 м/с).

Через определённое время тело достигает наибольшей высоты и на какой-то момент останавливается, т. е. его скорость становится равной нулю. Понятно, что чем бо́льшую начальную скорость получило тело при броске, тем больше будет время подъёма и тем на бо́льшую высоту оно поднимется к моменту остановки.

Затем под действием силы тяжести тело начинает равноускоренно падать вниз.

$\boldsymbol{v_x = v_{0x} + g_x t}$

При решении задач на движение тела вверх при действии на него только силы тяжести используют те же формулы, что и при прямолинейном равноускоренном движении с начальной скоростью $\vec{v}_0$, только a_x заменяют на g_x:

$\boldsymbol{s_x = v_{0x} t + \frac{g_x t^2}{2}}$

$$\boldsymbol{v_x = v_{0x} + g_x t} \quad \text{и} \quad \boldsymbol{s_x = v_{0x} t + \frac{g_x t^2}{2}}.$$

При этом учитывают, что при движении вверх вектор скорости тела и вектор ускорения свободного падения направлены в противоположные стороны, поэтому их проекции всегда имеют разные знаки.

Если, к примеру, ось X направлена вертикально вверх, т. е. сонаправлена с вектором скорости, то $v_x > 0$, значит, $v_x = v$, а $g_x < 0$, значит, $g_x = -g = -9{,}8$ м/с^2 (где v — модуль вектора мгновенной скорости, а g — модуль вектора ускорения).

Если же ось X направлена вертикально вниз, то $v_x < 0$, т. е. $v_x = -v$, а $g_x > 0$, т. е. $g_x = g = 9{,}8$ м/с^2.

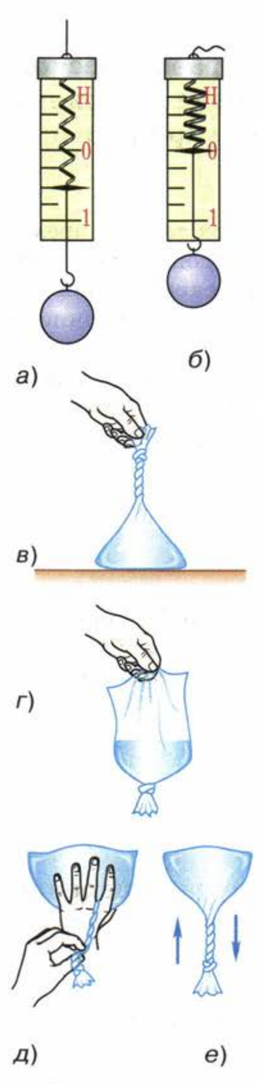


Рис. 31. Демонстрация невесомости тел при их свободном падении

Вес тела, движущегося под действием только силы тяжести, равен нулю. В этом можно убедиться с помощью опытов, изображённых на рисунке 31.

К самодельному динамометру подвешен металлический шарик. Согласно показаниям покоящегося динамометра, вес шарика (рис. 31, *а*) равен 0,5 Н. Если же нить, удерживающую динамометр, перерезать, то он будет свободно падать (сопротивлением воздуха в данном случае можно пренебречь). При этом его указатель переместится на нулевую отметку, свидетельствуя о том, что вес шарика равен нулю (рис. 31, *б*). Вес свободно падающего динамометра тоже равен нулю. В данном случае и шарик, и динамометр движутся с одинаковым ускорением, не оказывая друг на друга никакого влияния. Другими словами, и динамометр, и шарик находятся в состоянии ***невесомости***.

В рассмотренном опыте динамометр и шарик свободно падали *из состояния покоя*.

Теперь убедимся в том, что тело будет невесомым и в том случае, если его начальная скорость не равна нулю. Для этого возьмём полиэтиленовый пакет и примерно на $^1/_3$ заполним его водой; затем удалим из пакета воздух, скрутив его верхнюю часть в жгут и завязав на узел (рис. 31, *в*). Если взять пакет за нижнюю, заполненную водой часть и перевернуть, то свитая в жгут часть пакета под действием веса воды раскрутится и заполнится водой (рис. 31, *г*). Если же, переворачивая пакет, удерживать жгут, не позволяя ему раскрутиться (рис. 31, *д*), а затем подкинуть пакет вверх, то и во время подъёма, и во время падения жгут не будет раскручиваться (рис. 31, *е*). Это свидетельствует о том, что во время полёта вода не действует своим весом на пакет, так как становится невесомой.

Можно перекидывать этот пакет друг другу, тогда он будет лететь по параболической траектории. Но и в этом случае пакет сохранит в полёте свою форму, которую ему придали при броске.



1. Действует ли сила тяжести на подброшенное вверх тело во время его подъёма? **2.** С каким ускорением движется подброшенное вверх тело при отсутствии трения? Как меняется при этом скорость движения тела? **3.** От чего зависит наибольшая высота подъёма брошенного вверх тела в том случае, когда сопротивлением воздуха можно пренебречь? **4.** Что можно сказать о знаках проекций векторов мгновенной скорости тела и ускорения свободного падения при свободном движении этого тела вверх? **5.** Расскажите о ходе опытов, изображённых на рисунке 31. Какой вывод из них следует?

УПРАЖНЕНИЕ 14

Теннисный мяч бросили вертикально вверх с начальной скоростью 9,8 м/с. Через какой промежуток времени скорость поднимающегося мяча уменьшится до нуля? Какое перемещение от места броска совершит при этом мяч?

§ 15 ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

В курсе физики 7 класса вы изучали явление всемирного тяготения. Оно заключается в том, что *между всеми телами во Вселенной действуют силы притяжения*.

К выводу о существовании сил всемирного тяготения (их называют также ***гравитационными***) пришёл Ньютон в результате изучения движения Луны вокруг Земли и планет вокруг Солнца.

Заслуга Ньютона заключается не только в его гениальной догадке о взаимном притяжении тел, но и в том, что он сумел найти закон их взаимодействия, т. е. формулу для расчёта гравитационной силы между двумя телами.

Закон всемирного тяготения гласит:

два любых тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной массе каждого из них и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

где F — модуль вектора силы гравитационного притяжения между телами массами m_1 и m_2, r — расстояние между телами (их центрами); G — коэффициент, который называется ***гравитационной постоянной***.

Если $m_1 = m_2 = 1$ кг и $r = 1$ м, то, как видно из формулы, гравитационная постоянная G численно равна силе F. Другими словами, гравитационная постоянная численно равна силе F притяжения двух тел массой по 1 кг, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга. Измерения показывают, что

$$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

Формула даёт точный результат при расчёте силы всемирного тяготения в трёх случаях: 1) если размеры тел пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними (рис. 32, *а*); 2) если оба тела однородны и имеют шарообразную форму (рис. 32, *б*); 3) если одно из взаимодействующих тел — шар, размеры и масса которого значительно больше, чем у второго тела (любой формы), находящегося на поверхности этого шара или вблизи неё (рис. 32, *в*).

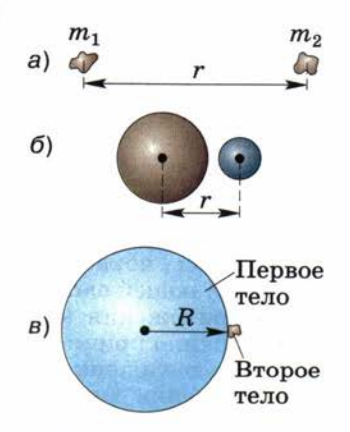
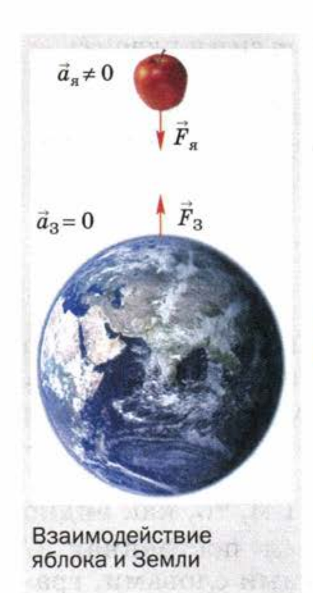


Рис. 32. Условия, определяющие границы применимости закона всемирного тяготения

Третий из рассмотренных случаев является основанием для того, чтобы рассчитывать по приведённой формуле силу притяжения к Земле любого из находящихся на ней тел. При этом в качестве расстояния между телами следует брать радиус Земли, поскольку размеры всех тел, находящихся на её поверхности или вблизи неё, пренебрежимо малы по сравнению с земным радиусом.




Взаимодействие яблока и Земли

По третьему закону Ньютона яблоко, висящее на ветке или падающее с неё с ускорением свободного падения, притягивает к себе Землю с такой же по модулю силой, с какой его притягивает Земля. Но ускорение Земли, вызванное силой её притяжения к яблоку, близко к нулю, поскольку масса Земли несоизмеримо больше массы яблока.

? Вопросы

1. Что было названо всемирным тяготением? **2.** Как иначе называются силы всемирного тяготения? **3.** Кто и в каком веке открыл закон всемирного тяготения? **4.** Сформулируйте закон всемирного тяготения. Запишите формулу, выражающую этот закон. **5.** В каких случаях следует применять закон всемирного тяготения для расчёта гравитационных сил? **6.** Притягивается ли Земля к висящему на ветке яблоку?

УПРАЖНЕНИЕ 15

1. Приведите примеры проявления силы тяготения.

2. Космическая станция летит от Земли к Луне. Как меняется при этом модуль вектора силы её притяжения к Земле; к Луне? С одинаковыми или различными по модулю силами притягивается станция к Земле и Луне, когда она находится посередине между ними? Если силы различны, то какая больше и во сколько раз? Все ответы обоснуйте. (Известно, что масса Земли примерно в 81 раз больше массы Луны.)

3. Известно, что масса Солнца в 330 000 раз больше массы Земли. Верно ли, что Солнце притягивает Землю в 330 000 раз сильней, чем Земля притягивает Солнце? Ответ поясните.

4. Мяч, подброшенный мальчиком, в течение некоторого времени двигался вверх. При этом его скорость всё время уменьшалась, пока не стала равной нулю. Затем мяч стал падать вниз с возрастающей скоростью. Объясните: а) действовала ли на мяч сила притяжения к Земле во время его движения вверх; вниз; б) что послужило причиной уменьшения скорости мяча при его движении вверх; увеличения его скорости при движении вниз; в) почему при движении мяча вверх его скорость уменьшалась, а при движении вниз — увеличивалась.

5. Притягивается ли к Луне человек, стоящий на Земле? Если да, то к чему он притягивается сильнее — к Луне или к Земле? Притягивается ли Луна к этому человеку? Ответы обоснуйте.

§ 16 УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ НА ЗЕМЛЕ И ДРУГИХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛАХ

Притяжение тел к Земле — один из случаев всемирного тяготения. Для нас, жителей Земли, эта сила имеет большое значение.

Сила $F = G\frac{M_З m}{R_З^2}$, с которой тело массой m притягивается к Земле, несколько отличается от действующей на это тело силы тяжести, определяемой по формуле $F_{тяж} = gm$ (это связано с тем, что Земля, вследствие её суточного вращения, не является строго инерциальной системой отсчёта). Но поскольку различие между указанными силами существенно меньше каждой из них, эти силы можно считать приблизительно равными.

Значит, для любого тела массой m, находящегося на поверхности Земли или вблизи неё, можно записать:

$$mg \approx G\frac{M_З m}{R_З^2},$$

или

$$g \approx G\frac{M_З}{R_З^2}.$$

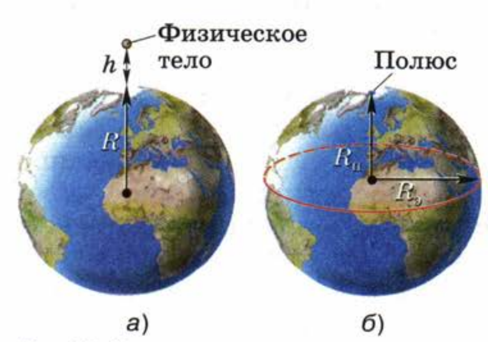


Рис. 33. Значение ускорения свободного падения зависит от высоты тела над Землёй и географической широты места

Из последней формулы следует, что ускорение свободного падения тел, находящихся на поверхности Земли или вблизи неё, зависит от массы Земли и её радиуса (т. е. расстояния между центром Земли и данным телом).

Если тело поднять на высоту h над Землёй, как показано на рисунке 33, a, то расстояние между этим телом и центром Земли будет $R_З + h$. Тогда $g \approx G\frac{M_З}{(R_З + h)^2}$.

Чем больше высота h, тем меньше g и тем меньше сила тяжести тела. Значит, с увеличением высоты тела над поверхностью Земли действующая на него сила тяжести уменьшается за счёт уменьшения ускорения свободного падения. Но уменьшение это обычно очень невелико, поскольку высота тела над Землёй чаще всего пренебрежимо мала по сравнению с радиусом Земли. Например, если альпинист массой 80 кг поднялся на гору высотой 3 км, то действующая на него сила тяжести уменьшится всего на 0,7 Н (или на 0,09%). Поэтому во многих случаях при расчёте силы тяжести тела, находящегося на небольшой высоте над Землёй, ускорение свободного падения считают равным 9,8 м/с^2, пренебрегая его небольшим уменьшением.

Значения коэффициента g (а значит, и значения силы тяжести) зависят также от географической широты места на земном шаре. Оно меняется от 9,78 м/с^2 на экваторе до 9,83 м/с^2 на полюсах, т. е. на полюсах оно чуть больше, чем на экваторе. Это и понятно: ведь Земля имеет не строго шарообразную форму. Она немного сплюснута у полюсов (рис. 33, *б*), поэтому расстояние от центра Земли до полюсов $R_п$ меньше, чем до экватора $R_э$. А согласно закону всемирного тяготения, чем меньше расстояние между телами, тем больше сила притяжения между ними.

Подставив в формулу для ускорения свободного падения вместо массы и радиуса Земли соответственно массу и радиус какой-либо другой планеты или её спутника, можно определить приблизительное значение ускорения свободного падения на поверхности любого из этих небесных тел. Например, ускорение свободного падения на Луне рассчитывается по формуле:

$$g_Л \approx G\frac{M_Л}{R_Л^2}.$$

Оказывается, что отношение $\frac{M_Л}{R_Л^2}$ в 6 раз меньше, чем $\frac{M_З}{R_З^2}$. Поэтому и ускорение свободного падения, и сила притяжения тел к Луне в 6 раз меньше, чем на Земле. Например, человек, масса которого 60 кг, к Земле притягивается с силой 588 Н, а к Луне — с силой 98 Н.

? Вопросы **1.** Верно ли, что притяжение тел к Земле является одним из примеров всемирного тяготения? **2.** Как меняется сила тяжести, действующая на тело, при его удалении от поверхности Земли? **3.** По какой формуле можно рассчитывать действующую на тело силу тяжести, если оно находится на небольшой высоте над Землёй? **4.** В каком случае сила тяжести, действующая на одно и то же тело, будет больше: если это тело находится в экваториальной области земного шара или на одном из полюсов? Почему? **5.** Что вы знаете об ускорении свободного падения на Луне?

УПРАЖНЕНИЕ 16

1. Чему равна сила тяжести, действующая на тело массой 2,5 кг; 600 г; 1,2 т; 50 т? (Принять $g = 10$ м/с^2.)

2. Определите приблизительно силу тяжести, действующую на человека массой 64 кг. (Принять $g = 10$ м/с^2.) Притягивается ли земной шар к этому человеку? Если да, то чему приблизительно равна эта сила?

3. Первый советский искусственный спутник Земли был запущен 4 октября 1957 г. Определите массу этого спутника, если известно, что на Земле на него действовала сила тяжести, равная 819,3 Н.

4. Ракета пролетает на расстоянии, равном 5000 км от поверхности Земли. Можно ли рассчитывать действующую на космическую ракету силу тяжести, принимая $g = 9,8$ м/с^2? (Известно, что радиус Земли приблизительно равен 6400 км.) Ответ поясните.

5. Ястреб в течение некоторого времени может парить на одной и той же высоте над Землёй. Значит ли это, что на него не действует сила тяжести? Что произойдёт с ястребом, если он сложит крылья?

6*. С Земли стартует космическая ракета. На каком расстоянии от поверхности Земли сила тяжести ракеты будет в 4 раза меньше, чем перед стартом; в 9 раз меньше, чем перед стартом?

Это любопытно...

Открытие планет Нептун и Плутон

С помощью закона всемирного тяготения и законов Ньютона были определены траектории движения планет Солнечной системы, а также рассчитаны их координаты в любой момент времени на много лет вперёд. Для этого сначала по закону всемирного тяготения вычислялась сила гравитационного взаимодействия между Солнцем и данной планетой. Затем с помощью второго закона Ньютона рассчитывалось ускорение, с которым планета движется вокруг Солнца. А по ускорению определялись и другие величины, характеризующие движение, в том числе и координаты.

При этом учитывалось также влияние других планет Солнечной системы на движение данной планеты.

Правильность рассчитанных таким образом орбит планет и их положения в любой момент времени подтверждалась результатами астрономических наблюдений.

В 1781 г. английский астроном ***Уильям Гершель*** путём наблюдений открыл седьмую планету Солнечной системы, которую назвали Уран.

Вскоре после этого было рассчитано, как будут меняться со временем координаты Урана и по какой орбите он будет двигаться.

В результате многолетних наблюдений за движением Урана в первой половине XIX в. учёные окончательно убедились в том, что реальная орбита Урана не совпадает с вычисленной. Создавалось впечатление, что за Ураном находится ещё одна планета, которая притягивает к себе Уран и тем самым влияет на его движение.

По отклонениям в движении Урана сначала английский учёный ***Джон Адамс***, а несколько позже и французский учёный ***Урбен Леверье*** на основании закона всемирного тяготения сумели вычислить местоположение этой предполагаемой планеты.

Адамс первым закончил работу и обратился к директору одной из обсерваторий с просьбой организовать поиски планеты, координаты которой он нашёл с помощью теоретических расчётов. В эту же обсерваторию с подобной просьбой обратился и Леверье.

Но по какой-то причине поиск планеты был отложен на неопределённый срок.

Тогда Леверье послал письмо с указанием точных координат планеты, которая, по его мнению, должна была находиться за Ураном, молодому сотруднику Берлинской обсерватории ***Иоганну Галле***.

23 сентября 1846 г. Галле, получив это письмо, без промедления приступил к наблюдениям и в ту же ночь обнаружил научно предсказанную

планету, координаты которой всего лишь на полградуса отличались от указанных в письме.

Пять дней спустя Леверье получил от директора Берлинской обсерватории поздравительное письмо, в котором, в частности, говорилось: «Ваше имя отныне будет связано с наиболее выдающимся из мыслимых доказательств справедливости закона всемирного тяготения».

По предложению Леверье планету назвали Нептун.

И только несколько лет спустя в научном мире была признана и заслуга Джона Адамса в открытии Нептуна.

С помощью расчётов, основанных, в частности, на применении закона всемирного тяготения, и целенаправленных астрономических наблюдений 18 февраля 1930 г. была открыта ещё одна планета Солнечной системы — Плутон, которая находится почти в три раза дальше от Солнца, чем Нептун.

Желая подчеркнуть, что открытие этих планет сделано теоретическим путём, т. е. исключительно с помощью расчётов, основанных на законах физики, говорят, что планеты Нептун и Плутон были открыты «на кончике пера».

В настоящее время Плутон причислен к карликовым планетам, так как, имея массу в 500 раз меньше земной и диаметр, составляющий $^2/_3$ лунного, он не соответствует определению понятия «планета», которое было дано в августе 2006 г. Международным астрономическим союзом.

§ 17 ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ И КРИВОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Действие на тело силы в одних случаях может привести к изменению только *модуля вектора* скорости этого тела, а в других — к изменению *направления* скорости. Покажем это на примерах.

На рисунке 34, *а* изображён шарик, лежащий на столе в точке A. Шарик привязан к одному из концов резинового шнура. Второй конец шнура прикреплён к столу в точке O. Если шарик переместить в точку B, то шнур растянется. При этом в нём возникнет сила упругости $\vec{F}$, действующая на шарик и стремящаяся вернуть его в первоначальное положение. Если теперь отпустить шарик, то под действием си-

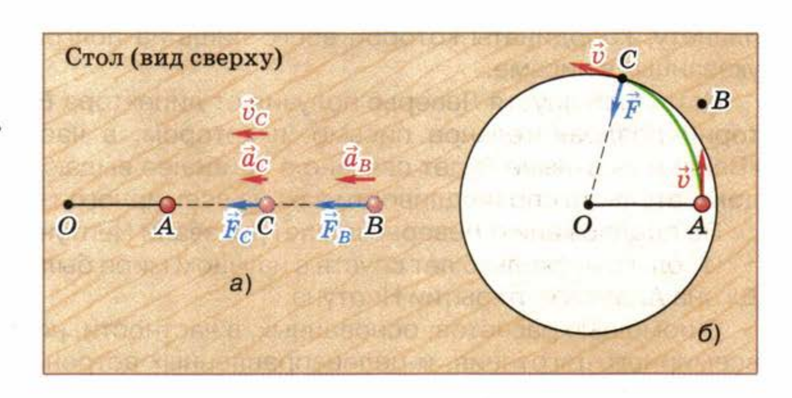


Рис. 34. Если скорость тела и действующая на него сила направлены вдоль одной прямой, то тело движется прямолинейно, а если они направлены вдоль пересекающихся прямых, тело движется криволинейно

лы $\vec{F}$ он будет ускоренно двигаться к точке A. В данном случае *скорость шарика в любой точке траектории* (например, в точке C) *сонаправлена с силой упругости и ускорением*, возникшим в результате действия этой силы. При этом меняется только модуль вектора скорости шарика, а *направление вектора скорости остаётся неизменным, и шарик движется прямолинейно*.

Теперь рассмотрим пример, в котором под действием силы упругости шарик движется *криволинейно* (т. е. траектория его движения представляет собой кривую линию). На рисунке 34, *б* изображён тот же шарик на резиновом шнуре, лежащий в точке A. Толкнём шарик к точке B, т. е. *придадим ему начальную скорость, направленную перпендикулярно отрезку OA*. Если бы на шарик не действовали никакие силы, то он сохранял бы величину и направление полученной скорости (вспомните явление инерции). Но, двигаясь к точке B, шарик удаляется от точки O и чуть-чуть растягивает шнур. Поэтому в шнуре возникает сила упругости $\vec{F}$, стремящаяся сократить его до первоначальной длины и одновременно приблизить шарик к точке O. В результате действия этой силы направление скорости шарика в

каждый момент его движения немного меняется, поэтому он движется *по криволинейной траектории AC. В любой точке траектории* (например, в точке C) *скорость шарика* $\vec{v}$ *и сила* $\vec{F}$ *направлены вдоль пересекающихся прямых*: скорость — по касательной к траектории, а сила — к точке O.

Рассмотренные примеры показывают, что действие на тело силы может привести к разным результатам в зависимости от направления векторов скорости и силы.

Если скорость тела и действующая на него сила направлены вдоль одной прямой, то тело движется прямолинейно, а если они направлены вдоль пересекающихся прямых, то тело движется криволинейно.

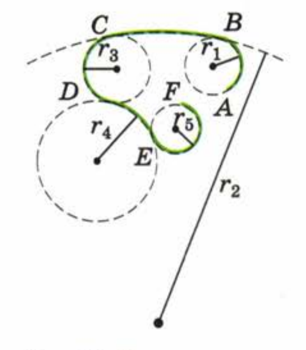


Рис. 35. Траектория *ABCDEF* может быть представлена в виде совокупности дуг окружностей разных радиусов

Верно и обратное утверждение: если тело движется криволинейно, то это значит, что на него действует какая-то сила, меняющая направление скорости, причём в каждой точке сила и скорость направлены вдоль пересекающихся прямых.

Существует бесчисленное множество различных криволинейных траекторий. Но часто кривые линии, например линия *ABCDEF* (рис. 35), могут быть представлены в виде совокупности дуг окружностей разных радиусов.

Поэтому во многих случаях изучение криволинейного движения тела сводится к изучению его движения по окружности.



1. Рассмотрите рисунок 34, *а* и ответьте на вопросы: под действием какой силы шарик приобретает скорость и движется от точки *B* к точке *A*? В результате чего эта сила возникла? Как направлены ускорение, скорость шарика и действующая на него сила? По какой траектории движется шарик? **2.** Рассмотрите рисунок 34, *б* и ответьте на вопросы: почему в шнуре возникла сила упругости и как она направлена по отношению к самому шнуру? Что можно сказать о направлении скорости шарика и действующей на него силы упругости шнура? Как движется шарик — прямолинейно или криволинейно? **3.** При каком условии тело под действием силы движется прямолинейно, а при каком — криволинейно?

УПРАЖНЕНИЕ 17



Рис. 36

1. Шарик катился по горизонтальной поверхности стола от точки A к точке B (рис. 36). В точке B на шарик подействовали силой $\vec{F}$. В результате он стал двигаться к точке C. В каком из направлений, обозначенных стрелками *1*, *2*, *3* и *4*, могла действовать сила $\vec{F}$?
2. На рисунке 37 изображена траектория движения шарика. На ней отмечены положения шарика через каждую секунду после начала движения. Действовала ли на шарик сила на участке 0—3; 4—6; 7—9; 10—12; 13—15; 16—19? Если сила действовала, то как она была направлена по отношению к вектору скорости? Почему на участке 7—9 шарик повернул налево, а на участке 10—12 — направо по отношению к направлению движения перед поворотом? Сопротивление движению не учитывайте.

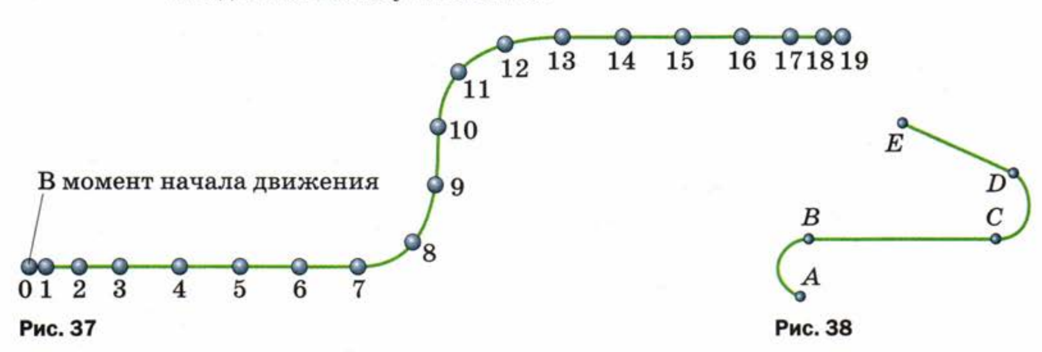


Рис. 37

Рис. 38

3*. На рисунке 38 линией $ABCDE$ изображена траектория движения некоторого тела. На каких участках на тело наверняка действовала сила? Могла ли на тело действовать какая-нибудь сила при его движении на других участках этой траектории? Все ответы обоснуйте.

§ 18 ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ПО ОКРУЖНОСТИ С ПОСТОЯННОЙ ПО МОДУЛЮ СКОРОСТЬЮ

В том, что мгновенная скорость тела в любой точке криволинейной траектории направлена по касательной в этой точке, можно убедиться на опыте.

Если к быстро вращающемуся точильному камню электроточила приложить металлический прут, то из-под него будут вырываться

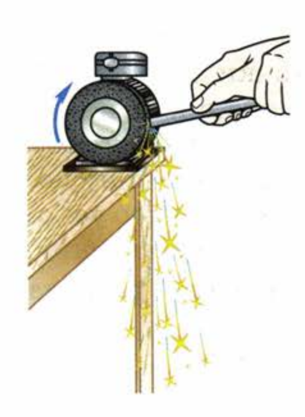


Рис. 39. Частицы вращающегося точильного камня, отрываясь от него при трении о металлический прут, летят по касательной к окружности в точке отрыва

искры (рис. 39). Это раскалённые частицы камня, отрывающиеся при трении о прут. Они летят с той скоростью, которой обладали в момент отрыва.

Из рисунка видно, что направление движения частиц, а значит, и вектор их скорости совпадает с касательной к окружности, по которой они двигались.

Напомним, что векторные величины характеризуются модулем и направлением. При изменении хотя бы одной из этих двух характеристик вектор меняется.

При движении тела по окружности *модуль вектора скорости* может меняться или оставаться постоянным, но *направление вектора скорости* обязательно меняется, т. е. вектор скорости тела, движущегося по окружности, является величиной переменной (независимо от того, меняется скорость по модулю или нет).

Значит, *движение по окружности всегда происходит с ускорением*.

В курсе физики 10 класса приводится строгое доказательство того, что ускорение, с которым тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, в любой точке направлено по радиусу окружности к её центру. Поэтому оно называется ***центростремительным***.

$$a_{ц.\,с} = \frac{v^2}{r}$$

Модуль вектора центростремительного ускорения $a_{ц.\,с}$ тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью v по окружности радиусом r, определяется по формуле:

$$a_{ц.\,с} = \frac{v^2}{r}.$$

Получить представление о направлении центростремительного ускорения можно по рисунку 40. На нём изображено тело (материальная точка), движущееся по окружности

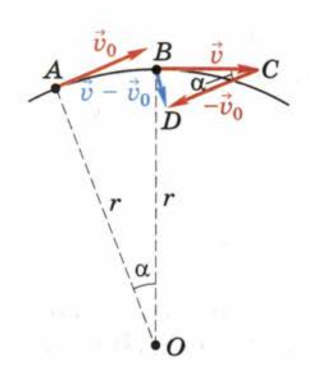


Рис. 40. Вектор центростремительного ускорения тела направлен вдоль радиуса к центру окружности

радиусом r. За очень малый промежуток времени t это тело переходит из точки A в точку B, которая расположена очень близко к точке A. При стремлении к нулю промежутка времени t точка B стремится к точке A, угол α — к нулю, а угол DBC — к 90°, т. е. при $t \to 0$ вектор ускорения, который совпадает по направлению с вектором $\vec{v} - \vec{v}_0$, направлен вдоль радиуса к центру окружности.

Пусть все участки траектории тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью, представляют собой дуги окружностей (см. рис. 35). Тогда ускорение тела в любой точке этой траектории будет направлено к центру соответствующей окружности и может быть определено по формуле для расчёта центростремительного ускорения.

По второму закону Ньютона ускорение всегда сонаправлено с силой, в результате действия которой оно возникает. Это справедливо и для центростремительного ускорения.

Значит, и *сила, под действием которой тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, в каждой точке направлена по радиусу окружности к её центру.*

Модуль вектора этой силы можно определить по формуле:

$$F = \frac{mv^2}{r}.$$

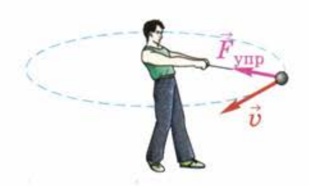


Рис. 41. Движение тела по окружности под действием силы упругости

Тела могут двигаться по окружности под действием сил разной природы. Например, шар легкоатлетического молота движется по окружности под действием силы упругости троса (рис. 41); планеты обращаются вокруг Солнца, а спутники — вокруг планет под действием силы всемирного тяготения; автомо-

биль совершает поворот за счёт силы трения колёс о дорогу; движение электронов вокруг ядра в атоме обусловлено действием сил электрического притяжения.

Под действием этих сил возникает ускорение, меняющее направление скорости тела, благодаря чему оно движется по окружности или её дуге.

? Вопросы

1. Опишите опыт, с помощью которого можно убедиться в том, что мгновенная скорость тела, равномерно движущегося по окружности, в любой точке этой окружности направлена по касательной к ней. 2. Как направлено ускорение тела при его движении по окружности с постоянной по модулю скоростью? Как называется это ускорение? 3. По какой формуле можно вычислить модуль вектора центростремительного ускорения? 4. Как направлена сила, под действием которой тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью?

УПРАЖНЕНИЕ 18

1. При работе стиральной машины в режиме сушки поверхность её барабана, находящаяся на расстоянии 21 см от оси вращения, движется вокруг этой оси со скоростью 20 м/с. Определите ускорение, с которым движутся точки поверхности барабана.

2. Определите ускорение конца секундной стрелки часов, если он находится на расстоянии $R = 2$ см от центра вращения. (Длина l окружности радиусом R определяется по формуле: $l = 6,28R$.)

3. Докажите, что ускорение движения крайней точки стрелки часов в два раза больше ускорения средней точки этой стрелки (т. е. точки, находящейся посередине между центром вращения стрелки и её концом).

4*. Минутная и секундная стрелки часов вращаются вокруг общего центра. Расстояния от центра вращения до концов стрелок одинаковы. Чему равно отношение ускорений, с которыми движутся концы стрелок? Какая стрелка движется с бóльшим ускорением?

5*. Масса Земли равна $6 \cdot 10^{24}$ кг, а масса Луны — $7 \cdot 10^{22}$ кг. Считая, что Луна движется вокруг Земли по окружности радиусом 384 000 км, определите: а) силу притяжения между Землёй и Луной; б) центростремительное ускорение, с которым Луна движется вокруг Земли; в) модуль скорости движения Луны относительно Земли.



§ 19 ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ

Обратимся ещё раз к рисунку 34, *б*. Если шарик толкнуть, а затем предоставить самому себе, то он опишет некоторую дугу и остановится. Причиной остановки шарика является действие на него силы трения и силы сопротивления воздуха, препятствующих движению и уменьшающих его скорость.

Если уменьшить действие тормозящих сил, то шарик может описать вокруг точки O одну или несколько окружностей, прежде чем остановится (при этом крепление шнура в точке O должно быть таким, чтобы оно не препятствовало движению шарика).

Если бы нам удалось устранить все силы сопротивления движению, то шарик бесконечно двигался бы вокруг точки O по замкнутой кривой, например по окружности. При этом направление скорости шарика непрерывно менялось бы под действием силы, направленной к центру окружности.

Примером подобного движения служит обращение планет вокруг Солнца и спутников вокруг планет.

Рассмотрим более детально вопрос о запуске и движении искусственных спутников Земли (сокращенно ИСЗ).

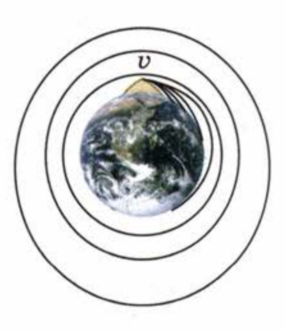


Рис. 42. Копия рисунка Ньютона

Чтобы понять, при каких условиях тело может стать искусственным спутником Земли, рассмотрим рисунок 42. Он представляет собой копию рисунка, сделанного Ньютоном. На этом рисунке изображён земной шар, а на нём показана высокая гора, с вершины которой бросают камни, придавая им различные по модулю горизонтально направленные скорости.

В подписи к рисунку говорится: «Брошенный камень отклонится под действием силы



Земля, окружённая ИСЗ и так называемым космическим мусором

тяжести от прямолинейного пути и, описав кривую траекторию, упадёт, наконец, на Землю. Если его бросить с большой скоростью, то он упадёт дальше». Продолжая эти рассуждения, Ньютон приходит к выводу, что при отсутствии сопротивления воздуха и при достаточно большой скорости тело вообще может не упасть на Землю, а будет описывать круговые траектории, оставаясь на одной и той же высоте над Землёй. Такое тело становится искусственным спутником Земли.

Движение спутника является примером свободного падения, так как происходит только под действием силы тяжести. Но спутник не падает на Землю благодаря тому, что обладает достаточно большой скоростью, направленной по касательной к окружности, по которой он движется. Так, естественный спутник Земли Луна (рис. 43) обращается вокруг планеты около четырёх миллиардов лет.

Значит, для того чтобы некоторое тело стало искусственным спутником Земли, его нужно вывести за пределы земной атмосферы и придать ему определённую скорость, направленную по касательной к окружности, по которой он будет двигаться.

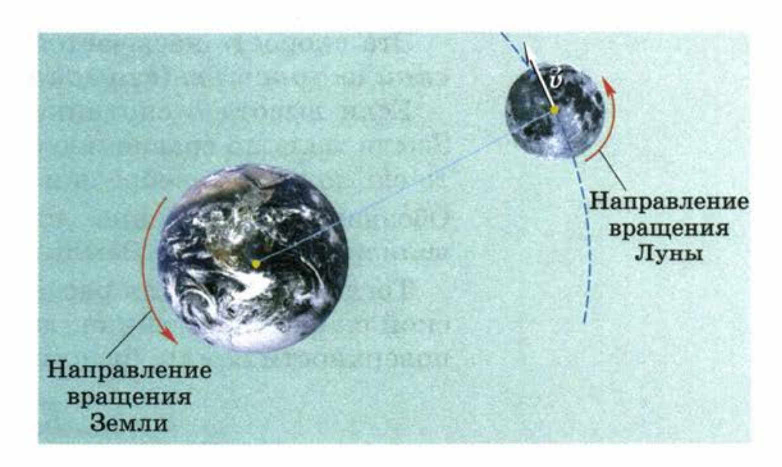


Рис. 43. Обращение Луны вокруг Земли является примером свободного падения

Наименьшая высота над поверхностью Земли, на которой сопротивление воздуха практически отсутствует, составляет примерно 300 км. Поэтому обычно спутники запускают на высоте 300—400 км от земной поверхности.

Выведем формулу для расчёта скорости, которую надо сообщить телу, чтобы оно стало искусственным спутником Земли, двигаясь вокруг неё по окружности.

Движение спутника происходит под действием одной только силы тяжести. Эта сила сообщает ему ускорение свободного падения g, которое в данном случае выполняет роль центростремительного ускорения.

Вы уже знаете, что центростремительное ускорение определяется по формуле: $a_{\text{ц. с}} = \frac{v^2}{r}$.

Значит, для спутника

$$g = \frac{v^2}{r}, \quad v^2 = gr,$$

$$\boldsymbol{v = \sqrt{gr}}.$$

$\boldsymbol{v = \sqrt{gr}}$

По этой формуле определяется скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно обращалось по окружности вокруг Земли на расстоянии r от её центра.

Эта скорость называется ***первой космической скоростью (круговой)***.

Если высота h спутника над поверхностью Земли мала по сравнению с земным радиусом, то ею можно пренебречь и считать, что $r \approx R_З$. Обозначим ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли g_0.

Тогда формула для расчёта первой космической скорости спутника, движущегося вблизи поверхности Земли, будет выглядеть так:

$$v = \sqrt{g_0 R_З}.$$



Движение ИСЗ по круговой орбите

Рассчитаем эту скорость, принимая радиус Земли равным 6400 км (или $6{,}4 \cdot 10^6$ м), а $g_0 = 9{,}8$ м/с^2.

$$v = \sqrt{9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 6{,}4 \cdot 10^2\ \text{м}} \approx 7{,}9 \cdot 10^3\ \text{м/с} =$$
$$= 7{,}9\ \text{км/с}.$$

Если же высотой h спутника над Землёй пренебречь нельзя, то расстояние r от центра Земли до спутника и ускорение свободного падения g на высоте h определяются по следующим формулам:

$$r = R_З + h,\ g \approx G\frac{M_З}{(R_З + h)^2}.$$

В этом случае формула для расчёта первой космической скорости примет вид:

$$v \approx \sqrt{G\frac{M_З}{(R_З + h)^2}(R_З + h)},$$

или

$$\boldsymbol{v \approx \sqrt{G\frac{M_З}{R_З + h}}}.$$

$$\boldsymbol{v \approx \sqrt{G\frac{M_З}{R_З + h}}}$$

По этой формуле можно рассчитать первую космическую скорость спутника любой планеты, если вместо массы и радиуса Земли подставить соответственно массу и радиус данной планеты.

Из формулы следует, что чем больше высота h, на которой запускается спутник, тем меньшую скорость v ему нужно сообщить для его движения по круговой орбите (так как h стоит в знаменателе дроби). Например, на высоте 300 км над поверхностью Земли первая космическая скорость приблизительно равна 7,8 км/с, а на высоте 500 км — 7,6 км/с.



Первый искусственный спутник Земли

Если скорость тела, запускаемого на высоте h над Землёй, превышает соответствующую этой высоте первую космическую, то его орбита представляет собой эллипс (см. рис. 42, внешнюю траекторию). Чем больше скорость, тем более вытянутой будет эллиптическая орбита. При скорости, равной 11,2 км/с, которая называется ***второй космической скоростью***, тело преодолевает притяжение к Земле и уходит в космическое пространство.

Для запуска спутников применяют ракеты. Двигатели ракеты должны совершить работу против сил тяжести и сил сопротивления воздуха, а также сообщить спутнику соответствующую скорость.

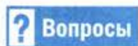
4 октября 1957 г. в Советском Союзе был запущен первый в истории человечества искусственный спутник Земли. Спутник в виде шара диаметром 58 см и массой 83,6 кг и ракета-носитель долгое время двигались над Землёй на высоте в несколько сотен километров.



Космический корабль «Восток»

12 апреля 1961 г. первый в мире лётчик-космонавт, наш соотечественник ***Юрий Алексеевич Гагарин*** совершил полёт в космос на космическом корабле «Восток».

В настоящее время сотни спутников запускаются каждый год в научно-исследовательских и практических целях: для осуществления теле- и радиосвязи, исследования атмосферы, прогнозирования погоды и т. д.



1. Приведите примеры (из области астрономии), доказывающие, что при отсутствии сил сопротивления тело может неограниченно долго двигаться по замкнутой траектории под действием силы, меняющей направление скорости движения этого тела. **2.** Почему спутники, обращаясь вокруг Земли под действием силы тяжести, не падают на Землю? **3.** Можно ли считать обращение спутника вокруг Земли свободным падением? **4.** Что необходимо сделать с физическим телом, чтобы оно стало искусственным спутником Земли? **5.** Выведите формулу для расчёта первой космической скорости спутника, движущегося по круговой орбите вблизи поверхности Земли. **6.** Как движется спутник, обладающий первой космической скоростью; второй космической скоростью?

УПРАЖНЕНИЕ 19

1. Определите скорость искусственного спутника Земли, если он движется по круговой орбите на высоте 2600 км над поверхностью Земли. ($M_З = 6 \cdot 10^{24}$ кг; $R_З = 6{,}4 \cdot 10^6$ м.)

2. Если бы на круговую орбиту вблизи поверхности Луны был выведен искусственный спутник, то он двигался бы со скоростью 1,67 км/с. Определите радиус Луны, если известно, что ускорение свободного падения на её поверхности равно 1,6 м/с^2.

§ 20 ИМПУЛЬС ТЕЛА. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Законы Ньютона позволяют решать различные практически важные задачи, касающиеся взаимодействия и движения тел. Большое число таких задач связано, например, с нахождением ускорения движущегося тела, если известны все действующие на это тело силы. А затем по ускорению определяют и другие величины (мгновенную скорость, перемещение и др.).

Но часто бывает очень сложно определить действующие на тело силы. Поэтому для решения многих задач используют ещё одну важнейшую физическую величину — *импульс тела*.

Импульсом тела $\vec{p}$ называется векторная физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость.

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

$\vec{p} = m\vec{v}$

Импульс — векторная величина. Направление вектора импульса тела всегда совпадает с направлением вектора скорости движения.

За единицу импульса в СИ принимают импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с. Значит, единицей импульса тела в СИ является **1 кг · м/с**.

При расчётах пользуются уравнением для проекций векторов:

$$p_x = mv_x.$$

В зависимости от направления вектора скорости по отношению к выбранной оси X проекция вектора импульса может быть как положительной, так и отрицательной.

Слово «импульс» (impulsus) в переводе с латинского означает «толчок». В некоторых книгах вместо термина «импульс» используется термин «количество движения».

Эта величина была введена в науку примерно в тот же период времени, когда Ньютоном были открыты законы, названные впоследствии его именем (т. е. в конце XVII в.).

При взаимодействии тел их импульсы могут изменяться. В этом можно убедиться на простом опыте.

Два шарика одинаковой массы подвешивают на нитяных петлях к укреплённой на кольце штатива деревянной линейке, как показано на рисунке 44, *а*.

Шарик *2* отклоняют от вертикали на угол α (рис. 44, *б*) и отпускают. Вернувшись в прежнее положение, он ударяет по шарику *1* и останавливается. При этом шарик *1* приходит

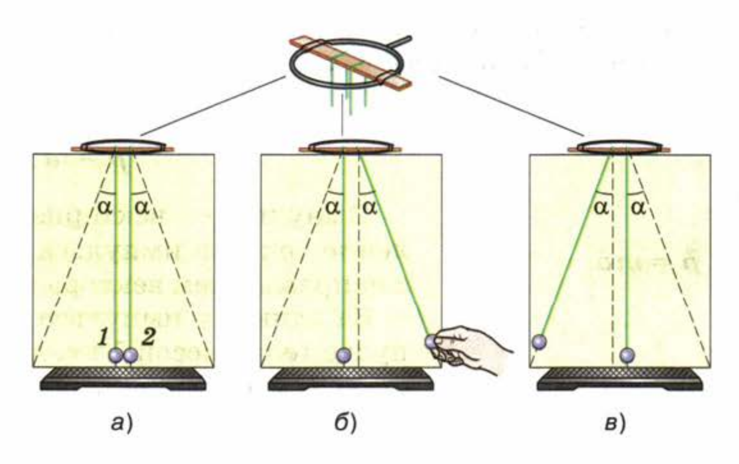


Рис. 44. Демонстрация закона сохранения импульса

в движение и отклоняется на тот же угол α (рис. 44, *в*).

В данном случае очевидно, что в результате взаимодействия шаров импульс каждого из них изменился: на сколько уменьшился импульс шара *2*, на столько же увеличился импульс шара *1*.

Если два или несколько тел взаимодействуют только между собой (т. е. не подвергаются воздействию внешних сил), то эти тела образуют *замкнутую систему*.

Импульс каждого из тел, входящих в замкнутую систему, может меняться в результате их взаимодействия друг с другом. Но

векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, не меняется с течением времени при любых движениях и взаимодействиях этих тел.

В этом заключается ***закон сохранения импульса.***

Закон сохранения импульса выполняется и в том случае, если на тела системы действуют внешние силы, *векторная сумма которых равна нулю*. Покажем это, воспользовавшись для вывода закона сохранения импульса вторым и третьим законами Ньютона. Для простоты рассмотрим систему, состоящую только из двух тел — шаров массами m_1 и m_2, которые движутся прямолинейно навстречу друг другу со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ (рис. 45).

Силы тяжести, действующие на каждый из шаров, уравновешиваются силами упругости поверхности, по которой они катятся. Значит, действие этих сил можно не учитывать. Силы сопротивления движению в данном случае малы, поэтому их влияние мы тоже не будем учитывать. Таким образом, можно считать, что шары взаимодействуют только друг с другом.

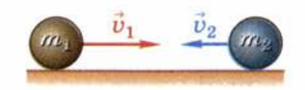


Рис. 45. Система из двух тел — шаров, движущихся прямолинейно навстречу друг другу

Из рисунка 45 видно, что через некоторое время шары столкнутся. Во время столкнове-

ния, длящегося в течение очень короткого промежутка времени t, возникнут силы взаимодействия $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, приложенные соответственно к первому и второму шару. В результате действия сил скорости шаров изменятся. Обозначим скорости шаров после соударения буквами $\vec{v}'_1$ и $\vec{v}'_2$.

В соответствии с третьим законом Ньютона силы взаимодействия шаров равны по модулю и направлены в противоположные стороны:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

По второму закону Ньютона каждую из этих сил можно заменить произведением массы и ускорения, полученного каждым из шаров при взаимодействии:

$$m_1\vec{a}_1 = -m_2\vec{a}_2.$$

Ускорения, как вы знаете, определяются из равенств:

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{v}'_1 - \vec{v}_1}{t},$$

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{v}'_2 - \vec{v}_2}{t}.$$

Заменив в уравнении для сил ускорения соответствующими выражениями, получим:

$$m_1\frac{\vec{v}'_1 - \vec{v}_1}{t} = -m_2\frac{\vec{v}'_2 - \vec{v}_2}{t}.$$

В результате сокращения обеих частей равенства на t получим:

$$m_1(\vec{v}'_1 - \vec{v}_1) = -m_2(\vec{v}'_2 - \vec{v}_2),$$

или

$$m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_1 = -m_2\vec{v}'_2 + m_2\vec{v}_2.$$

Сгруппируем члены этого уравнения следующим образом:

$$\boldsymbol{m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2 = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2.} \qquad (1)$$

Учитывая, что $m\vec{v} = \vec{p}$, запишем уравнение (1) в таком виде:

$$\vec{p}_1' + \vec{p}_2' = \vec{p}_1 + \vec{p}_2. \quad (2)$$

$\vec{p}_1' + \vec{p}_2' = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$

Левые части уравнений (1) и (2) представляют собой суммарный импульс шаров после их взаимодействия, а правые — суммарный импульс до взаимодействия.

Значит, **несмотря на то, что импульс каждого из шаров при взаимодействии изменился, векторная сумма их импульсов после взаимодействия осталась такой же, как и до взаимодействия.**

Уравнения (1) и (2) являются математической записью закона сохранения импульса.

Поскольку в данном курсе рассматриваются только взаимодействия тел, движущихся вдоль одной прямой, то для записи закона сохранения импульса в скалярной форме достаточно одного уравнения, в которое входят проекции векторных величин на ось X:

$$m_1 v_{1x}' + m_2 v_{2x}' = m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x}.$$

? Вопросы

1. Что называют импульсом тела? 2. Что можно сказать о направлениях векторов импульса и скорости движущегося тела? 3. Расскажите о ходе опыта, изображённого на рисунке 44. О чём он свидетельствует? 4. Что означает утверждение о том, что несколько тел образуют замкнутую систему? 5. Сформулируйте закон сохранения импульса. 6. Для замкнутой системы, состоящей из двух тел, запишите закон сохранения импульса в виде уравнения, в которое входили бы массы и скорости этих тел. Поясните, что означает каждый символ в этом уравнении.

УПРАЖНЕНИЕ 20

1. Две игрушечные заводные машины, массой по 0,2 кг каждая, движутся прямолинейно навстречу друг другу. Скорость каждой машины относительно земли равна 0,1 м/с. Равны ли векторы импульсов машин; модули векторов импульсов? Определите проекцию импульса каждой из машин на ось X, параллельную их траектории.

2. На сколько изменится (по модулю) импульс автомобиля массой 1 т при изменении его скорости от 54 до 72 км/ч?

3. Человек сидит в лодке, покоящейся на поверхности озера. В какой-то момент он встаёт и идёт с кормы на нос. Что произойдёт при этом с лодкой? Объясните явление на основе закона сохранения импульса.

4. Железнодорожный вагон массой 35 т подъезжает к стоящему на том же пути неподвижному вагону массой 28 т и автоматически сцепляется с ним. После сцепки вагоны движутся прямолинейно со скоростью 0,5 м/с. Какова была скорость вагона массой 35 т перед сцепкой?

§ 21 РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ. РАКЕТЫ

Рассмотрим несколько примеров, подтверждающих справедливость закона сохранения импульса.

Наверняка многие из вас наблюдали, как приходит в движение надутый воздухом воздушный шарик, если развязать нить, стягивающую его отверстие.

Объяснить это явление можно с помощью закона сохранения импульса.

Пока отверстие шарика завязано, шарик с находящимся внутри него сжатым воздухом покоится, и его импульс равен нулю.

При открытом отверстии из него с довольно большой скоростью вырывается струя сжатого воздуха. Движущийся воздух обладает некоторым импульсом, направленным в сторону его движения.

Согласно действующему в природе закону сохранения импульса, суммарный импульс системы, состоящей из двух тел — шарика и воздуха в нём, должен остаться таким же, каким был до начала истечения воздуха, т. е. равным нулю. Поэтому шарик начинает двигаться в противоположную струе воздуха сторону с такой скоростью, что его импульс равен по модулю импульсу воздушной струи. Векторы

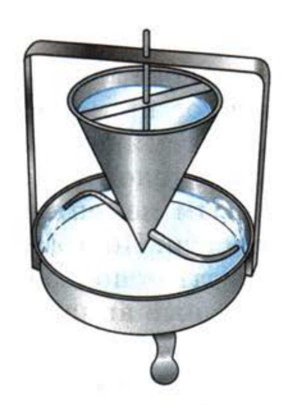


Рис. 46. Демонстрация реактивного движения с помощью сегнерова колеса

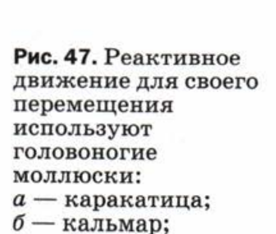
импульсов шарика и воздуха направлены в противоположные стороны. В результате суммарный импульс взаимодействующих тел остаётся равным нулю.

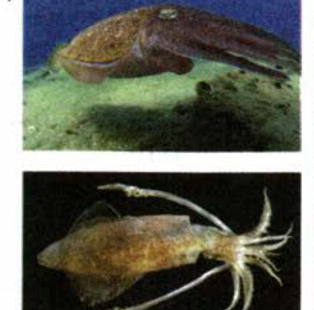
Движение шарика является примером ***реактивного движения.*** Реактивное движение происходит за счёт того, что от тела отделяется и движется какая-то его часть, в результате чего само тело приобретает противоположно направленный импульс.

На принципе реактивного движения основано вращение устройства, называемого ***сегнеровым колесом*** (рис. 46). Вода, вытекающая из сосуда конической формы через сообщающуюся с ним изогнутую трубку, вращает сосуд в направлении, противоположном скорости воды в струях. Следовательно, реактивное действие оказывает не только струя газа, но и струя жидкости.

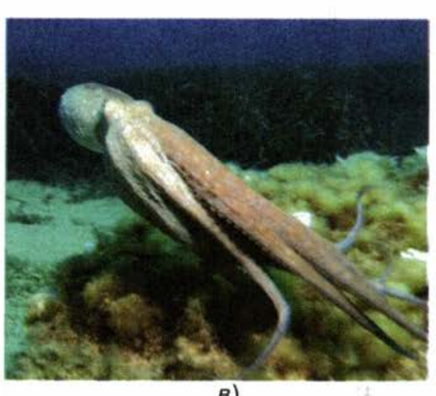
Реактивное движение используют для своего перемещения и некоторые живые существа, например осьминоги, кальмары, каракатицы и другие головоногие моллюски (рис. 47). Движутся они благодаря тому, что всасывают, а затем с силой выталкивают из себя воду. Существует даже разновидность кальмаров, которые с помощью своих «реактивных двигателей» могут не только плавать в воде, но и на короткое время вылетать из неё, чтобы

а)





б)



в)

Рис. 47. Реактивное движение для своего перемещения используют головоногие моллюски:
а — каракатица;
б — кальмар;
в — осьминог


Старт ракеты-носителя с космическим кораблём «Союз»

поскорее настичь добычу или спастись от врагов.

Вы знаете, что принцип реактивного движения находит широкое практическое применение в авиации и космонавтике. В космическом пространстве нет среды, с которой тело могло бы взаимодействовать и тем самым изменять направление и модуль своей скорости. Поэтому для космических полётов могут быть использованы только реактивные летательные аппараты, т. е. ракеты.

Рассмотрим вопрос об устройстве и запуске так называемых *ракет-носителей*, т. е. ракет, предназначенных для вывода в космос искусственных спутников Земли, космических кораблей, автоматических межпланетных станций и других полезных грузов.

В любой ракете, независимо от её конструкции, всегда имеется оболочка и топливо с окислителем. На рисунке 48 изображена ракета в разрезе. Мы видим, что оболочка ракеты включает в себя полезный груз (в данном случае это космический корабль *1*), приборный отсек *2* и двигатель (камера сгорания *6*, насосы *5* и пр.).

Основную массу ракеты составляет топливо *4* с окислителем *3* (окислитель нужен для поддержания горения топлива, поскольку в космосе нет кислорода).

Топливо и окислитель с помощью насосов подаются в камеру сгорания. Топливо, сгорая, превращается в газ высокой температуры и высокого давления, который мощной струёй устремляется наружу через раструб специальной формы, называемый *сопло́м* *7*. Назначение сопла состоит в том, чтобы повысить скорость струи.

С какой целью увеличивают скорость выхода струи газа? Дело в том, что от этой скорости зависит скорость ракеты. Это можно показать с помощью закона сохранения импульса.

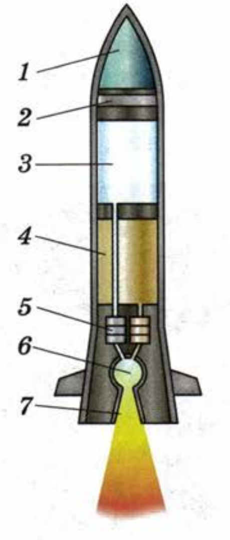


Рис. 48. Схема ракеты



Рис. 49. Схема трёхступенчатой ракеты

Для простоты рассуждений будем пока считать, что ракета представляет собой замкнутую систему (т. е. не будем учитывать действие на неё силы земного притяжения).

Поскольку до старта импульс ракеты был равен нулю, то по закону сохранения суммарный импульс движущейся оболочки и выбрасываемого из неё газа тоже должен быть равен нулю. Отсюда следует, что импульс оболочки и направленный противоположно ему импульс струи газа должны быть равны по модулю. Значит, чем с большей скоростью вырывается газ из сопла, тем больше будет скорость оболочки ракеты.

Помимо скорости истечения газа существуют и другие факторы, от которых зависит скорость движения ракеты.

Мы рассмотрели устройство и принцип действия одноступенчатой ракеты, где под ступенью подразумевается та часть, которая содержит баки с горючим и окислителем и двигатель. В практике космических полётов обычно используют многоступенчатые ракеты, развивающие гораздо бóльшие скорости и предназначенные для более дальних полётов, чем одноступенчатые.



КОНСТАНТИН ЭДУАРДОВИЧ ЦИОЛКОВСКИЙ

(1857—1935)

Российский учёный и изобретатель в области аэродинамики, ракетодинамики, теории самолёта и дирижабля. Основоположник теоретической космонавтики

На рисунке 49 показана схема трёхступенчатой ракеты. После того как топливо и окислитель первой ступени будут полностью израсходованы, эта ступень автоматически отбрасывается и в действие вступает двигатель второй ступени.

Уменьшение общей массы ракеты путём отбрасывания уже ненужной ступени позволяет сэкономить топливо и окислитель и увеличить скорость ракеты. Затем таким же образом отбрасывается вторая ступень.



СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ КОРОЛЁВ

(1907—1966)

Советский учёный, конструктор ракетно-космических систем. Основоположник практической космонавтики

Если возвращение космического корабля на Землю или его посадка на какую-либо другую планету не планируется, то третья ступень, как и две первых, используется для увеличения скорости ракеты. Если же корабль должен совершить посадку, то она используется для торможения корабля перед посадкой. При этом ракету разворачивают на 180°, чтобы сопло оказалось впереди. Тогда вырывающийся из ракеты газ сообщает ей импульс, направленный против скорости её движения, что приводит к уменьшению скорости и даёт возможность осуществить посадку.

Идея использования ракет для космических полётов была выдвинута в начале XX в. русским учёным и изобретателем ***Константином Эдуардовичем Циолковским***. Циолковский разработал теорию движения ракет, вывел формулу для расчёта их скорости, был первым, кто предложил использовать многоступенчатые ракеты.

Полвека спустя идея Циолковского была развита и реализована советскими учёными под руководством ***Сергея Павловича Королёва***.

? Вопросы **1.** Основываясь на законе сохранения импульса, объясните, почему воздушный шарик движется противоположно струе выходящего из него сжатого воздуха. **2.** Приведите примеры реактивного движения тел. **3.** Каково назначение ракет? Расскажите об устройстве и принципе действия ракеты. **4.** От чего зависит скорость ракеты? **5.** В чём заключается преимущество многоступенчатых ракет перед одноступенчатыми? **6.** Как осуществляется посадка космического корабля?

УПРАЖНЕНИЕ 21

1. С лодки, движущейся со скоростью 2 м/с, человек бросает весло массой 5 кг с горизонтальной скоростью 8 м/с противоположно движению лодки. С какой скоростью стала двигаться лодка после броска, если её масса вместе с человеком равна 200 кг?

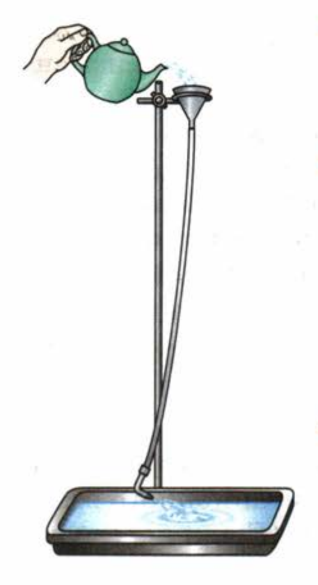


Рис. 50

2. Какую скорость получит модель ракеты, если масса её оболочки равна 300 г, масса пороха в ней 100 г, а газы вырываются из сопла со скоростью 100 м/с? (Считайте истечение газа из сопла мгновенным.)

3. На каком оборудовании и как проводится опыт, изображённый на рисунке 50? Какое физическое явление в данном случае демонстрируется, в чём оно заключается и какой физический закон лежит в основе этого явления?

Примечание: резиновая трубка была расположена вертикально до тех пор, пока через неё не начали пропускать воду.

4. Проделайте опыт, изображённый на рисунке 50. Когда резиновая трубка максимально отклонится от вертикали, перестаньте лить воду в воронку. Пока оставшаяся в трубке вода вытекает, понаблюдайте, как будет меняться: а) дальность полёта воды в струе (относительно отверстия в стеклянной трубке); б) положение резиновой трубки. Объясните оба изменения.

§ 22 ВЫВОД ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Из курса физики 8 класса вы знаете, что *сумма потенциальной* (mgh) *и кинетической* $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$ *энергии тела или системы тел называется полной механической* (или *механической*) *энергией.*

Вам известен также ***закон сохранения механической энергии***:

механическая энергия замкнутой системы тел остаётся постоянной, если между телами системы действуют только силы тяготения и силы упругости и отсутствуют силы трения.

Потенциальная и кинетическая энергия системы могут меняться, преобразуясь друг в друга. При уменьшении энергии одного вида на

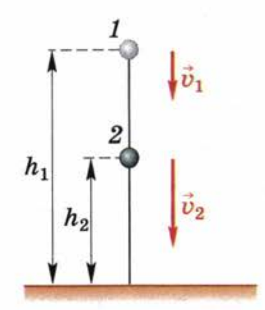


Рис. 51. Свободное падение шарика на землю с некоторой высоты

столько же увеличивается энергия другого вида, благодаря чему их сумма остаётся неизменной.

Подтвердим справедливость закона сохранения энергии теоретическим выводом. Для этого рассмотрим такой пример. Маленький стальной шарик массой m свободно падает на землю с некоторой высоты. На высоте h_1 (рис. 51) шарик имеет скорость v_1, а при снижении до высоты h_2 его скорость возрастает до значения v_2.

Работа действующей на шарик силы тяжести может быть выражена и через уменьшение потенциальной энергии гравитационного взаимодействия шарика с Землёй ($E_п$), и через увеличение кинетической энергии шарика ($E_к$):

$$A = Fs = mg(h_1 - h_2),$$

$$A = Fs = \frac{mg(v_2^2 - v_1^2)}{2g} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} \text{ или}$$

$$A = mgh_1 - mgh_2,$$

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Поскольку левые части уравнений равны, то равны и их правые части:

$$mgh_1 - mgh_2 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Из этого уравнения следует, что при движении шарика его потенциальная и кинетическая энергия менялась. При этом кинетическая энергия возросла на столько же, на сколько уменьшилась потенциальная.

После перестановки членов в последнем уравнении получим:

$$\boldsymbol{mgh_1 + \frac{mv_1^2}{2} = mgh_2 + \frac{mv_2^2}{2}}. \qquad (1)$$

Уравнение, записанное в таком виде, свидетельствует о том, что полная механическая энергия шарика при его движении остаётся постоянной.

Оно может быть записано и так:

$$E_{п1} + E_{к1} = E_{п2} + E_{к2}. \quad (2)$$

$E_{п1} + E_{к1} = E_{п2} + E_{к2}$

Уравнения (1) и (2) представляют собой математическую запись закона сохранения механической энергии.

Таким образом, мы теоретически доказали, что полная механическая энергия тела (точнее, замкнутой системы тел шарик—Земля) сохраняется, т. е. не меняется с течением времени.

Рассмотрим применение закона сохранения механической энергии для решения задач.

Пример 1. Яблоко массой 200 г падает с дерева с высоты 3 м. Какой кинетической энергией оно будет обладать на высоте 1 м от земли?

Дано:	СИ
$m = 200$ г	0,2 кг
$h_1 = 3$ м	
$h_2 = 1$ м	
$v_1 = 0$	
$g = 10$ м/с^2	
$E_{к2}$ — ?	

Решение:

Согласно закону сохранения механической энергии:

$E_{п1} + E_{к1} = E_{п2} + E_{к2}$.

Поскольку $E_{к1} = \frac{mv_1^2}{2} = \frac{m \cdot 0}{2} = 0$, то $E_{п1} = E_{п2} + E_{к2} \Rightarrow$

$\Rightarrow E_{к2} = E_{п1} - E_{п2} = mgh_1 - mgh_2 = mg(h_1 - h_2)$;

$E_{к2} = 0{,}2 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot (3 \text{ м} - 1 \text{ м}) =$

$= 0{,}2 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 2 \text{ м} = 4 \ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = 4 \text{ Н} \cdot \text{м} =$

$= 4$ Дж.

Ответ: $E_{к2} = 4$ Дж.

Пример 2. Мяч бросают вниз с высоты $h_1 = 1,8$ м со скоростью $v_1 = 8$ м/с. На какую высоту h_2 отскочит мяч после удара о землю? (Потери энергии при движении мяча и его ударе о землю не учитывайте.)

Дано:	**Решение:**
$h_1 = 1,8$ м $v_1 = 8$ м/с $g = 10$ м/с^2	Поскольку скорость отскочившего от земли мяча при его подъёме на максимальную высоту равна нулю, то закон сохранения механической энергии для данного случая будет выглядеть так:
h_2 — ?	

$$mgh_1 + \frac{mv_1^2}{2} = mgh_2.$$

Преобразуем уравнение и выразим h_2:

$$m\left(gh_1 + \frac{v_1^2}{2}\right) = mgh_2,$$

откуда $h_2 = \dfrac{2gh_1 + v_1^2}{2g}$;

$$h_2 = \frac{(2 \cdot 10\ \text{м/с}^2 \cdot 1,8\ \text{м} + 64\ \text{м}^2/\text{с}^2)}{2 \cdot 10\ \text{м/с}^2} =$$

$$= \frac{(36\ \text{м}^2/\text{с}^2 + 64\ \text{м}^2/\text{с}^2)}{20\ \text{м/с}^2} = \frac{100\ \text{м}^2/\text{с}^2}{20\ \text{м/с}^2} = 5\ \text{м}.$$

Ответ: $h_2 = 5$ м.



1. Что называется механической (полной механической) энергией? 2. Сформулируйте закон сохранения механической энергии. Запишите его в виде уравнений. 3. Может ли меняться с течением времени потенциальная или кинетическая энергия замкнутой системы?

УПРАЖНЕНИЕ 22

1. Решите рассмотренную в параграфе задачу из примера 2 без использования закона сохранения механической энергии.

2. Оторвавшаяся от крыши сосулька падает с высоты $h_0 = 36$ м от земли. Какую скорость v она будет иметь на высоте $h = 31$ м? (Принять $g = 10$ м/с^2.)

3. Шарик вылетает из детского пружинного пистолета вертикально вверх с начальной скоростью $v_0 = 5$ м/с. На какую высоту от места вылета он поднимется? (Принять $g = 10$ м/с^2.)

ЗАДАНИЕ

- Придумайте и проведите простой опыт, наглядно демонстрирующий, что тело движется криволинейно, если скорость движения этого тела и действующая на него сила направлены вдоль пересекающихся прямых. Опишите используемое оборудование, ваши действия и наблюдаемые результаты.

ИТОГИ ГЛАВЫ

САМОЕ ГЛАВНОЕ

Ниже даны названия физических законов и их формулировки. Последовательность изложения формулировок законов не соответствует последовательности их названий.

Перенесите в тетрадь названия физических законов и в квадратные скобки впишите порядковый номер формулировки, соответствующей названному закону.

- **Первый закон Ньютона (закон инерции) [ ];**
- **второй закон Ньютона [ ];**
- **третий закон Ньютона [ ];**
- **закон всемирного тяготения [ ];**
- **закон сохранения импульса [ ];**
- **закон сохранения механической энергии [ ].**

1. Ускорение тела прямо пропорционально равнодействующей сил, приложенных к телу, и обратно пропорционально его массе.
2. Механическая энергия замкнутой системы тел остаётся постоянной, если между телами системы действуют только силы тяготения и силы упругости и отсутствуют силы трения.

3. Два любых тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной массе каждого из них и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.
4. Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, не меняется с течением времени при любых движениях и взаимодействиях этих тел.
5. Существуют такие системы отсчёта, относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела или действия других тел компенсируются.
6. Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению.

ПРОВЕРЬ СЕБЯ

1. Определением скорости прямолинейного равномерного движения является уравнение

   А. $\vec{v} = \vec{a}t$

   Б. $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$

   В. $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$

   Г. $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$

2. Второй закон Ньютона представлен уравнением

   А. $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$

   Б. $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

   В. $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$

   Г. $a = \frac{v^2}{r}$

3. Закон всемирного тяготения представлен уравнением

А. $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$

Б. $g = G\frac{M}{R^2}$

В. $F = \rho g V$

Г. $F = \frac{mv^2}{r}$

4. Закон сохранения импульса представлен уравнением

А. $mgh_1 + \frac{mv_1^2}{2} = mgh_2 + \frac{mv_2^2}{2}$

Б. $m_1\vec{v}_1' + m_2\vec{v}_2' = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2$

В. $E_{п1} + E_{к1} = E_{п2} + E_{к2}$

Г. $\vec{p}_1' + \vec{p}_2' = -(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)$



Выполните задания, предложенные в электронном приложении.

Глава 2

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ЗВУК

§ 23 КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

С одним из видов неравномерного движения — равноускоренным — вы уже знакомы.

Рассмотрим ещё один вид неравномерного движения — *колебательное*.

Колебательные движения широко распространены в окружающей нас жизни. Примерами колебаний могут служить: движение иглы швейной машины, качелей, маятника часов, вагона на рессорах и многих других тел.

На рисунке 52 изображены тела, которые могут совершать колебательные движения, если их вывести из положения равновесия (т. е. отклонить или сместить от линии OO').

В движении этих тел можно найти много различий. Например, шарик на нити (рис. 52, *а*) движется криволинейно, а цилиндр на резиновом шнуре (рис. 52, *б*) — прямоли-

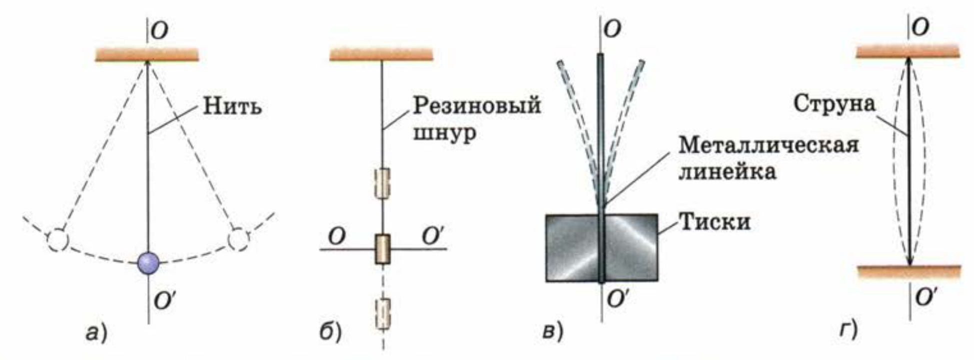


Рис. 52. Примеры тел, совершающих колебательные движения

нейно; верхний конец линейки (рис. 52, *в*) колеблется с бо́льшим размахом, чем средняя точка струны (рис. 52, *г*). За одно и то же время одни тела могут совершать большее число колебаний, чем другие.

Но при всём разнообразии этих движений у них есть важная общая черта: *через определённый промежуток времени движение любого тела повторяется.*

Действительно, если шарик отвести от положения равновесия и отпустить, то он, пройдя через положение равновесия, отклонится в противоположную сторону, остановится, а затем вернётся к месту начала движения. За этим колебанием последует второе, третье и т. д., похожие на первое.

Повторяющимися будут и движения остальных тел, изображённых на рисунке 52.

Промежуток времени, через который движение повторяется, называется ***периодом колебаний.*** Поэтому говорят, что *колебательное движение периодично.*

В движении тел, изображённых на рисунке 52, кроме периодичности есть ещё одна общая черта: за промежуток времени, равный периоду колебаний, любое тело дважды проходит через положение равновесия (двигаясь в противоположных направлениях).

Повторяющиеся через равные промежутки времени движения, при которых тело многократно и в разных направлениях проходит положение равновесия, называются механическими колебаниями.

Именно такие колебания и будут предметом нашего изучения.

На рисунке 53 изображён шарик с отверстием, надетый на гладкую стальную струну и прикреплённый к пружине (другой конец которой прикреплён к вертикальной стойке). Шарик может свободно скользить по струне, т. е. силы трения настолько малы, что не оказывают существенного влияния на его движе-

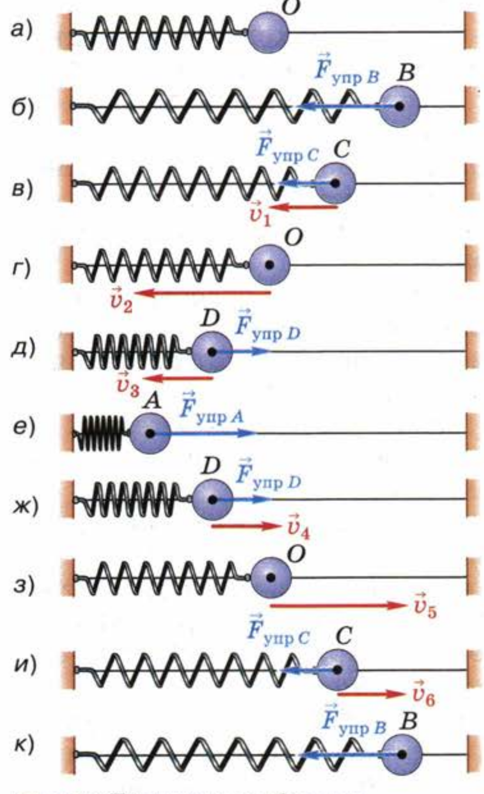


Рис. 53. Динамика свободных колебаний горизонтального пружинного маятника

ние. Когда шарик находится в точке O (рис. 53, *а*), пружина не деформирована (не растянута и не сжата), поэтому никакие силы в горизонтальном направлении на него не действуют. Точка O — *положение равновесия шарика*.

Переместим шарик в точку B (рис. 53, *б*). Пружина при этом растянется, и в ней возникнет сила упругости $\vec{F}_{упр\,B}$. Эта сила пропорциональна *смещению* (т. е. отклонению шарика от положения равновесия) и направлена противоположно ему. Значит, при смещении шарика вправо действующая на него сила направлена влево, *к положению равновесия*.

Если отпустить шарик, то под действием силы упругости он начнёт ускоренно перемещаться влево, к точке O. Направление силы упругости и вызванного ею ускорения будет совпадать с направлением скорости шарика, поэтому по мере приближения шарика к точке O его скорость будет всё время возрастать. При этом сила упругости с уменьшением деформации пружины будет уменьшаться (рис. 53, *в*).

Напомним, что любое тело обладает свойством сохранять свою скорость, если на него не действуют силы или если равнодействующая сил равна нулю. Поэтому, дойдя до положения равновесия (рис. 53, *г*), где сила упругости станет равна нулю, шарик не остановится, а будет продолжать двигаться влево.

При его движении от точки O к точке A пружина будет сжиматься. В ней снова возникнет сила упругости, которая и *в этом случае*

будет направлена к положению равновесия (рис. 53, *д*, *е*). Поскольку сила упругости направлена против скорости движения шарика, то она тормозит его движение. В результате в точке *A* шарик остановится. Сила упругости, направленная к точке *O*, будет продолжать действовать, поэтому шарик вновь придёт в движение и на участке *AO* его скорость будет возрастать (рис. 53, *е*, *ж*, *з*).

Движение шарика от точки *O* к точке *B* снова приведёт к растяжению пружины, вследствие чего опять возникнет сила упругости, *направленная к положению равновесия* и замедляющая движение шарика до полной его остановки (рис. 53, *з*, *и*, *к*). Таким образом, шарик совершит одно полное колебание. При этом *в каждой точке его траектории (кроме точки O) на него будет действовать сила упругости пружины, направленная к положению равновесия.*

Под действием силы, возвращающей тело в положение равновесия, тело может совершать колебания как бы само по себе. Первоначально эта сила возникла благодаря тому, что мы совершили работу по растяжению пружины, сообщив ей некоторый запас энергии. За счёт этой энергии и происходили колебания.

Колебания, происходящие только благодаря начальному запасу энергии, называются свободными колебаниями.

Свободно колеблющиеся тела всегда взаимодействуют с другими телами и вместе с ними образуют систему тел, которая получила название *колебательной системы*. В рассмотренном примере в колебательную систему входят шарик, пружина и вертикальная стойка, к которой прикреплён левый конец пружины. В результате взаимодействия этих тел и возникает сила, возвращающая шарик к положению равновесия.

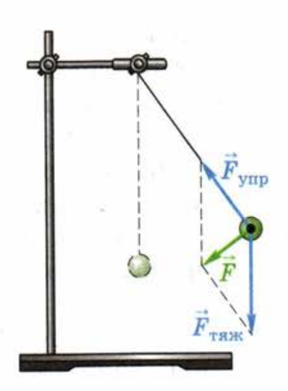


Рис. 54. Нитяной маятник

На рисунке 54 изображена колебательная система, состоящая из шарика, нити, штатива и Земли (Земля на рисунке не показана). В данном случае шарик совершает свободные колебания под действием двух сил: силы тяжести и силы упругости нити. Их равнодействующая направлена к положению равновесия.

Системы тел, которые способны совершать свободные колебания, называются колебательными системами.

Одно из основных общих свойств всех колебательных систем заключается в возникновении в них силы, возвращающей систему в положение устойчивого равновесия.

Колебательные системы — довольно широкое понятие, применимое к разнообразным явлениям.

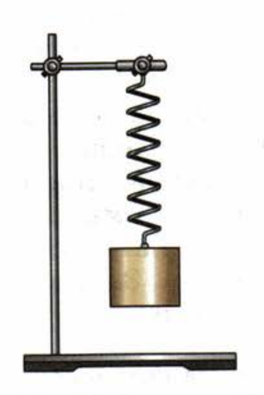


Рис. 55. Пружинный маятник

Рассмотренные колебательные системы называются ***маятниками***. Существует несколько типов маятников: *нитяные* (см. рис. 54), *пружинные* (см. рис. 53, 55) и т. д.

В общем случае

маятником называется твёрдое тело, совершающее под действием приложенных сил колебания около неподвижной точки или вокруг оси.

Колебательное движение будем изучать на примере пружинного и нитяного маятников.



1. Приведите примеры колебательных движений. **2.** Как вы понимаете утверждение о том, что колебательное движение периодично? **3.** Что называется механическими колебаниями? **4.** Пользуясь рисунком 53, объясните, почему по мере приближения шарика к точке O с любой стороны его скорость увеличивается, а по мере удаления от точки O в любую сторону скорость шарика уменьшается. **5.** Почему шарик не останавливается, дойдя до положения равновесия? **6.** Какие колебания называются свободными? **7.** Какие системы называются колебательными? Приведите примеры.

а)

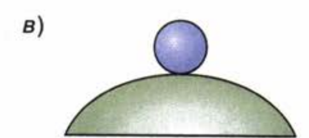


Шарик на горизонтальной поверхности

б)

Шарик на дне чаши

в)



Шарик на выпуклой поверхности

г)

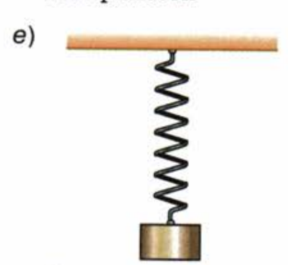


Тонкая ветка дерева

д)

Поршень в цилиндре

е)



Пружинный маятник

Рис. 56



УПРАЖНЕНИЕ 23



Рис. 57

1. Рассмотрите рисунок 56 и укажите, какие системы являются колебательными, а какие — нет.

2. На рисунке 57 изображён металлический диск, подвешенный на трёх резиновых шнурах. Если диск немного повернуть вокруг вертикальной оси и отпустить, то он будет в течение некоторого времени поворачиваться вокруг этой оси то по ходу часовой стрелки, то против. Объясните: а) под действием какой силы происходят колебания диска; б) возникла бы эта сила или нет, если бы диск не действовал на шнуры своим весом; в) какие тела входят в эту колебательную систему; г) является ли эта система маятником.

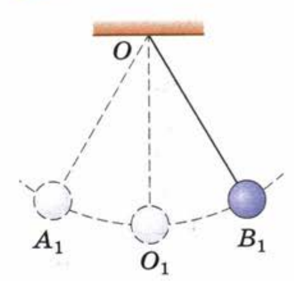
3. Что общего в колебательном движении подвешенного к нити груза (см. рис. 52, *а*) и движении по окружности шара легкоатлетического молота (см. рис. 41)? Чем отличаются эти движения?

§ 24 ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Сравним колебания двух одинаковых маятников, изображённых на рисунке 58. Первый маятник колеблется с бóльшим размахом, т. е. его крайние положения находятся дальше

от положения равновесия, чем у второго маятника.

Наибольшее (по модулю) отклонение колеблющегося тела от положения равновесия называется амплитудой колебаний.



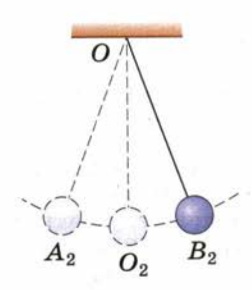


Рис. 58. Колебания маятников, происходящие с разной амплитудой

Будем рассматривать колебания, происходящие с малыми амплитудами (рис. 59), при которых длину дуги $\breve{AB}$ можно считать равной отрезку AB и даже полухорде CB. Поэтому под амплитудой колебаний нитяного маятника можно понимать как дугу, так и любой из этих отрезков. Так, амплитуда колебаний первого маятника (см. рис. 58) равна O_1A_1 или O_1B_1, а второго — O_2A_2 или O_2B_2. Амплитуду обозначают буквой A и в СИ измеряют в единицах длины — *метрах* (**м**), *сантиметрах* (**см**) и др. Амплитуду можно измерять также в единицах плоского угла, например в градусах, поскольку дуге окружности соответствует определённый центральный угол, т. е. угол с вершиной в центре окружности (в данном случае в точке O).

Амплитуда колебаний пружинного маятника (см. рис. 53) равна длине отрезка OB или OA.

Колеблющееся тело совершает одно полное колебание, если от начала колебаний проходит путь, равный четырём амплитудам. Например, переместившись из точки O_1 в точку B_1, затем в точку A_1 и вновь в точку O_1 (см. рис. 58), шарик совершает одно полное колебание.

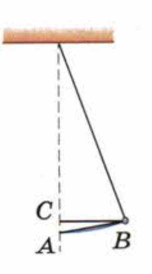


Рис. 59. При колебаниях с малой амплитудой длина дуги $\breve{AB}$ равна отрезку AB

Промежуток времени, в течение которого тело совершает одно полное колебание, называется периодом колебаний.

Период колебаний обозначается буквой T и в СИ измеряется в *секундах* (**с**).

Подвесим два одинаковых шарика на нитях разной длины и приведём их в колебательное движение. Увидим, что за один и тот же промежуток времени короткий маятник совершит больше колебаний, чем длинный.

Число колебаний в единицу времени называется частотой колебаний.

Обозначается частота греческой буквой ν («ню»). За единицу частоты принято одно колебание в секунду. Эта единица в честь немецкого учёного ***Генриха Герца*** названа *герцем* **(Гц)**.

Допустим, в одну секунду маятник совершает два колебания, т. е. частота его колебаний равна 2 Гц $\left(\text{или } 2\,\frac{1}{\text{с}}\right)$. Чтобы найти период колебания, необходимо одну секунду разделить на число колебаний в эту секунду, т. е. на частоту:

$$T = \frac{1}{2\ \text{Гц}} = \frac{1}{2\,\frac{1}{\text{с}}} = 0{,}5\ \text{с}.$$

$$\boldsymbol{T = \frac{1}{\nu}}$$

$$\boldsymbol{\nu = \frac{1}{T}}$$

Таким образом, период колебания T и частота колебаний ν связаны следующей зависимостью:

$$\boldsymbol{T = \frac{1}{\nu}}, \quad \text{или} \quad \boldsymbol{\nu = \frac{1}{T}}.$$

На примере колебаний маятников разной длины приходим к выводу: *частота и период свободных колебаний нитяного маятника зависят от длины его нити*. Чем больше длина нити маятника, тем больше период колебаний и меньше частота. (Эту зависимость вы будете исследовать при выполнении лабораторной работы № 3.)

Свободные колебания в отсутствие трения и сопротивления воздуха называются собственными колебаниями, а их частота — собственной частотой колебательной системы.

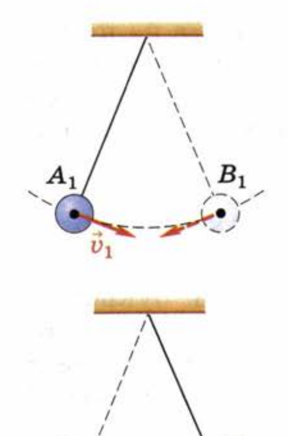


Рис. 60. Колебания маятников, происходящие в противоположных фазах

Не только нитяной маятник, но и любая другая колебательная система имеет определённую собственную частоту, зависящую от параметров этой системы. Например, собственная частота пружинного маятника зависит от массы груза и жёсткости пружины.

Рассмотрим колебания двух одинаковых маятников (рис. 60). В один и тот же момент времени левый маятник из крайнего левого положения начинает движение вправо, а правый маятник из крайнего правого положения движется влево. Оба маятника колеблются с одной и той же частотой (поскольку длины их нитей равны) и с одинаковыми амплитудами. Однако эти колебания отличаются друг от друга: *в любой момент времени скорости маятников направлены в противоположные стороны*. В таком случае говорят, что колебания маятников происходят в *противоположных фазах*.

Маятники, изображённые на рисунке 58, тоже колеблются с одинаковыми частотами. Скорости этих маятников в любой момент времени направлены одинаково. В этом случае говорят, что маятники колеблются *в одинаковых фазах*.

Рассмотрим ещё один случай. В момент, изображённый на рисунке 61, *а*, скорости обоих маятников направлены вправо. Но через некоторое время (рис. 61, *б*) они будут направлены в разные стороны. В таком случае говорят, что колебания происходят с определённой ***разностью фаз***.

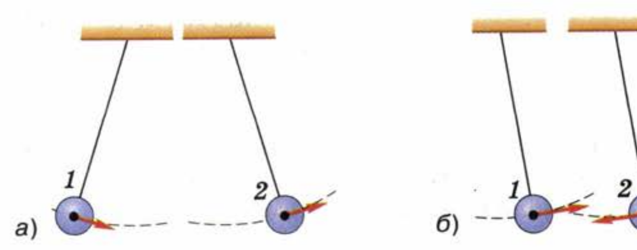


Рис. 61. Колебания маятников, происходящие с некоторой разностью фаз

Физическая величина, называемая *фазой*, используется не только при сравнении колебаний двух или нескольких тел, но и для описания колебаний одного тела.

Формула для определения фазы в любой момент времени будет рассмотрена в старших классах.

Таким образом, *колебательное движение характеризуется амплитудой, частотой* (или *периодом*) *и фазой*.

? Вопросы

1. Что называется амплитудой колебаний; периодом колебаний; частотой колебаний? В каких единицах измеряется каждая из этих величин? **2.** Какая математическая зависимость существует между периодом и частотой колебаний? **3.** Как зависят: а) частота; б) период свободных колебаний маятника от длины его нити? **4.** Какие колебания называются собственными? **5.** Что называется собственной частотой колебательной системы?

УПРАЖНЕНИЕ 24

1. На рисунке 62 изображены пары колеблющихся маятников. В каких случаях два маятника колеблются: в одинаковых фазах по отношению друг к другу; в противоположных фазах?

2. Частота колебаний стометрового железнодорожного моста равна 2 Гц. Определите период этих колебаний.

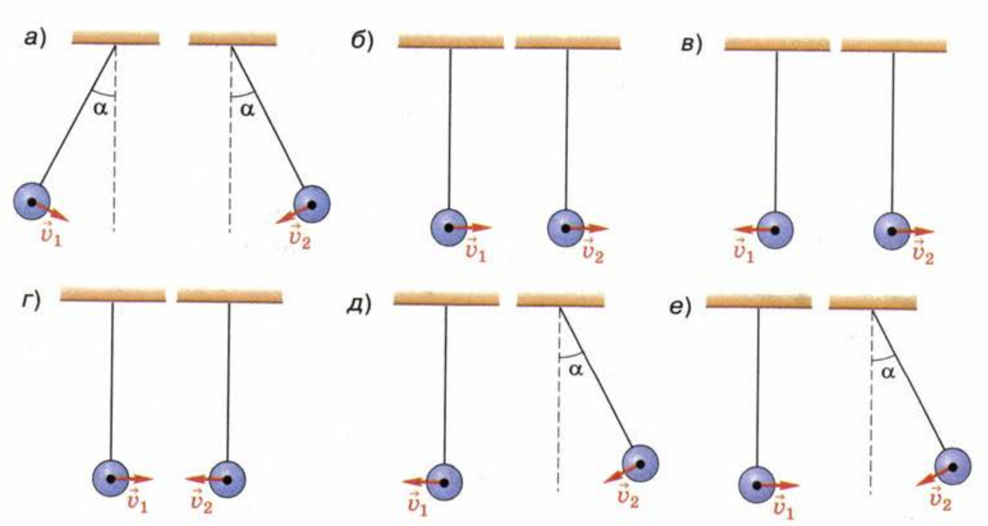


Рис. 62

3. Период вертикальных колебаний железнодорожного вагона равен 0,5 с. Определите частоту колебаний вагона.

4. Игла швейной машины делает 600 полных колебаний в минуту. Какова частота колебаний иглы?

5. Амплитуда колебаний груза на пружине равна 3 см. Какой путь от положения равновесия пройдёт груз за время, равное $\frac{1}{4}T$; $\frac{1}{2}T$; $\frac{3}{4}T$; T?

6. Амплитуда колебаний груза на пружине равна 10 см, частота 0,5 Гц. Какой путь пройдёт груз за 2 с?

ЗАДАНИЕ

- Спланируйте эксперимент с участием магнитных сил, имитирующих увеличение ускорения свободного падения и действующих на колеблющийся нитяной маятник. Проведите этот эксперимент и сделайте вывод о качественной зависимости периода колебаний от ускорения свободного падения.



§ 25 ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

В природе и технике широко распространены колебания, называемые ***гармоническими***.

Гармоническими являются колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению колеблющейся точки и направленной противоположно этому смещению.

Вы уже знаете, что под действием такой силы происходят колебания пружинного маятника, поэтому при определённых условиях они могут служить примером гармонических колебаний (в частности, при условии, что на них не оказывает заметного влияния сила трения).

С помощью опыта, изображённого на рисунке 63, выясним, по какому закону меняется с течением времени координата колеблющегося пружинного маятника и как выглядит график этой зависимости.

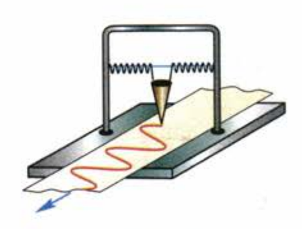


Рис. 63. Опыт по исследованию зависимости от времени координаты пружинного маятника, совершающего колебания

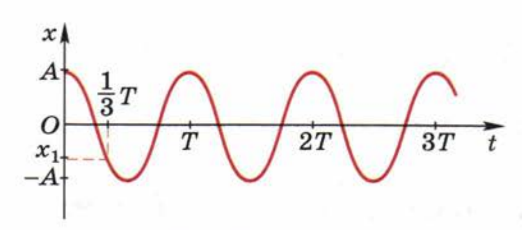


Рис. 64. График зависимости координаты колеблющегося пружинного маятника от времени

В данном опыте в качестве груза берут какой-нибудь небольшой массивный сосуд с маленьким отверстием снизу (например, воронку), а под него кладут длинную бумажную ленту. Сосуд с предварительно насыпанным в него песком (или налитой красящей жидкостью) приводят в колебательное движение. Если ленту перемещать с постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном плоскости колебаний, то на ней останется волнообразная дорожка из песка, каждая точка которой соответствует положению колеблющегося груза в тот момент, когда он проходил над ней.

На рисунке 64 показан вид полученной кривой. Она называется ***косинусоидой*** (из курса математики старших классов вы узнаете о том, что аналогичные графики имеют функции типа $y = \sin x$ и $y = \cos x$ при переменной x). Через точки, соответствующие положению равновесия маятника, проведена ось времени t, а перпендикулярно ей — ось смещения x.

Из графика видно, что наибольшие отклонения груза от положения равновесия в обе стороны одинаковы по модулю и равны амплитуде колебаний A.

Маятник начал движение из крайней точки с координатой $x = A$. За время, равное периоду T, маятник совершил полное колебание, т. е., миновав положение равновесия, дошёл до противоположной крайней точки с координатой $x = -A$, на мгновение задержался в ней, изменив направление скорости на противоположное, затем пошёл в обратном направлении и, вторично пройдя через положение равновесия, вернулся в то же самое место, откуда начал движение. Затем начинается следующее колебание и т. д.

Если в ходе опыта был измерен промежуток времени t, за который маятник совершил показанные на графике колебания, то можно определить их период T, разделив это время на чис-

ло колебаний: $T = \frac{t}{N}$. Зная период, можно найти частоту колебаний: $\nu = \frac{1}{T}$.

График даёт возможность приблизительно определить координату груза в любой момент времени. Например, через $\frac{1}{3}T$ от момента начала первого колебания груз находился в точке с координатой x_1.

Если график зависимости координаты от времени какого-нибудь тела представляет собой синусоиду (косинусоиду), т. е. если координата меняется со временем по закону синуса (косинуса), то в этом случае говорят, что *и координата, и само тело совершают гармонические колебания.*

Периодические изменения во времени физической величины, происходящие по закону синуса или косинуса, называются гармоническими колебаниями.

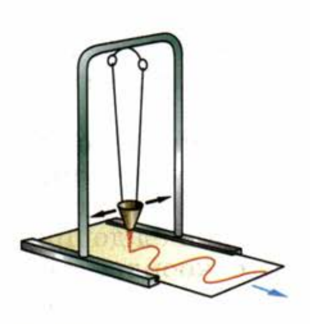


Рис. 65. Гармонические колебания нитяного маятника

На рисунке 65 изображён опыт, аналогичный рассмотренному выше, только для нитяного маятника. С помощью этого опыта можно показать, что и для нитяного маятника график зависимости координаты от времени тоже представляет собой синусоиду, т. е. что его колебания являются гармоническими.

Теоретически колебания нитяного маятника были бы строго гармоническими в том случае, если бы он представлял собой материальную точку, колеблющуюся без трения с малой амплитудой[1] при не меняющемся со временем

[1] Напомним, что под малой подразумевается такая амплитуда, при которой траекторию движения маятника можно считать прямолинейной. Числовое значение амплитуды, удовлетворяющее этому условию, зависит от точности результата, требуемой в решаемой задаче. В большинстве практических задач малой можно считать амплитуду, если угол отклонения не превышает 8°.

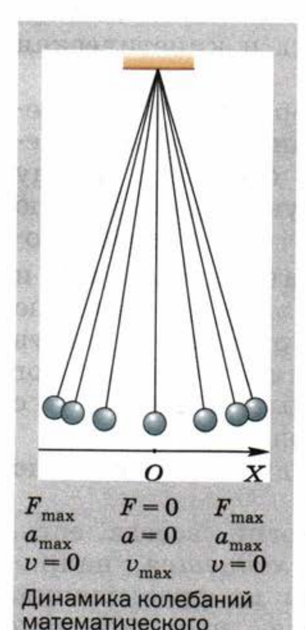
расстоянии от неё до точки подвеса. (Можно доказать, что только при этих условиях сила, возвращающая точку в положение равновесия, будет прямо пропорциональна смещению, вследствие чего колебания будут происходить по гармоническому закону, т. е. по закону изменения синуса или косинуса.)

Материальная точка, колеблющаяся на не меняющемся со временем расстоянии от точки подвеса, называется математическим маятником.

Математический маятник — это абстрактная модель, реально таких маятников не бывает.

Практически колебания, близкие к гармоническим, совершает тяжёлый шарик (например, стальной), подвешенный на лёгкой и малорастяжимой нити, длина которой значительно больше диаметра этого шарика, при малой амплитуде и малом трении.

При совершении телом гармонических колебаний не только его координата, но и такие величины, как сила, ускорение, скорость, тоже изменяются по закону синуса или косинуса. Это следует из известных вам законов и формул, в которых указанные величины попарно связаны прямо пропорциональной зависимостью, например $F_x = -kx$ (закон Гука), $a_x = \frac{F_x}{m}$ (второй закон Ньютона). Из этих формул следует, что сила и ускорение достигают наибольших значений, когда колеблющееся тело находится в крайних положениях, где смещение наиболее велико, и равны нулю, когда тело проходит через положение равновесия. Значит, колебательное движение вблизи среднего положения тела наиболее близко к равномерному, а вблизи крайних положений сильно отличается от равномерного движения.



Динамика колебаний математического маятника

Скорость же, наоборот, в крайних положениях равна нулю, а при прохождении телом положения равновесия достигает наибольшего значения.

Вопросы

1. По рисунку 63 расскажите о цели, порядке выполнения и результатах изображённого опыта. **2.** Чему соответствуют отрезки *OA* и *OT* на графике (см. рис. 64)? **3.** Какие колебания называются гармоническими? **4.** Что можно показать с помощью опыта, изображённого на рисунке 65? **5.** Что называется математическим маятником? **6.** При каких условиях реальный нитяной маятник будет совершать колебания, близкие к гармоническим? **7.** Как меняются действующая на тело сила, его ускорение и скорость при совершении им гармонических колебаний?

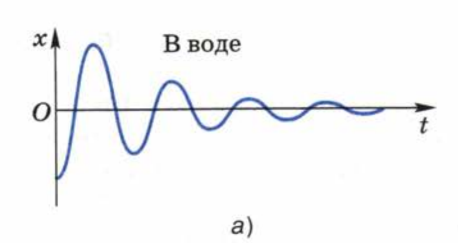
§ 26 ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Обратимся ещё раз к рисунку 53. Перемещая шарик из точки *O* (положения равновесия) в точку *B*, мы растягиваем пружину. При этом мы совершаем некоторую работу по преодолению силы её упругости, благодаря чему пружина приобретает потенциальную энергию. Если теперь отпустить шарик, то по мере его приближения к точке *O* деформация пружины и потенциальная энергия маятника будут уменьшаться, а скорость и кинетическая энергия — увеличиваться.

Допустим, что потери энергии на преодоление сил трения при движении маятника пренебрежимо малы. Тогда, согласно закону сохранения энергии, полную механическую энергию маятника (т. е. $E_п + E_к$) в любой момент времени можно считать одинаковой и равной той потенциальной энергии, которую мы изначально сообщили пружине, растянув её на длину отрезка *OB*. При этом маятник мог бы совершать колебания сколь угодно долго с постоянной амплитудой, равной *OB*.

Так было бы, если бы при движении не было никаких потерь энергии.

Но реально потери энергии всегда есть. *Механическая энергия расходуется*, например, на совершение работы по преодолению сил сопротивления воздуха, *переходя при этом во внутреннюю энергию*. Амплитуда ко-



а)



б)

Рис. 66. Графики зависимости от времени амплитуды свободных колебаний, происходящих в воде и в воздухе

лебаний постепенно уменьшается, и через некоторое время колебания прекращаются. Такие колебания называются ***затухающими*** (рис. 66).

Чем больше силы сопротивления движению, тем быстрее прекращаются колебания. Например, в воде колебания затухают быстрее, чем в воздухе (рис. 66, *а*, *б*).

До сих пор рассматривались свободные колебания, т. е. колебания, происходящие за счёт начального запаса энергии.

Свободные колебания всегда затухающие, так как весь запас энергии, первоначально сообщённый колебательной системе, в конце концов уходит на совершение работы по преодолению сил трения и сопротивления среды (т. е. механическая энергия переходит во внутреннюю). Поэтому свободные колебания почти не имеют практического применения.

Чтобы колебания были незатухающими, необходимо восполнять потери энергии за каждый период колебаний. Это можно осуществить, воздействуя на колеблющееся тело периодически изменяющейся силой. Например, каждый раз подталкивая качели в такт их колебаниям, можно добиться того, чтобы колебания не затухали.

Колебания, совершаемые телом под действием внешней периодически изменяющейся силы, называются вынужденными колебаниями.

Внешняя периодически изменяющаяся сила, вызывающая эти колебания, называется ***вынуждающей силой***.


Вынужденные колебания качелей

Если на покоящиеся качели начать действовать периодически меняющейся вынуждающей силой, то в течение некоторого времени амплитуда вынужденных колебаний качелей будет возрастать, т. е. амплитуда каждого последующего колебания будет больше, чем предыдущего. Увеличение амплитуды прекратится тогда, когда энергия, теряемая качелями на преодоление силы трения, станет равна энергии, получаемой ими извне (за счёт работы вынуждающей силы).

В большинстве случаев постоянная частота вынужденных колебаний устанавливается не сразу, а спустя некоторое время после их начала.

Когда амплитуда и частота вынужденных колебаний перестают меняться, говорят, что *колебания установились*.

Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы.

Вынужденные колебания могут совершать даже тела, которые не являются колебательными системами, например, игла швейной машины, поршни в двигателе внутреннего сгорания и многие другие. Колебания таких тел тоже происходят с частотой вынуждающей силы.

Вынужденные колебания — *незатухающие*. Они происходят до тех пор, пока действует вынуждающая сила.

? Вопросы

1. Что можно сказать о полной механической энергии колеблющегося маятника в любой момент времени, если допустить, что потерь энергии нет? Согласно какому закону это можно утверждать? 2. Как меняется с течением времени амплитуда свободных колебаний, происходящих в реальных условиях? В чём причина такого изменения? 3. Где быстрее прекратятся колебания маятника — в воздухе или в воде? Почему? (Начальный запас энергии в обоих случаях одинаков.) 4. Могут ли свободные колебания быть незатухающими? Почему? Что необходимо делать для того, чтобы колебания были незатухающими? 5. Что можно сказать о частоте установившихся вынужденных колебаний и частоте вынуждающей силы? 6. Могут ли тела, не являющиеся колебательными системами, совершать вынужденные колебания? Приведите примеры. 7. До каких пор происходят вынужденные колебания?

УПРАЖНЕНИЕ 25

1. Горизонтальный пружинный маятник, изображённый на рисунке 53, отвели в сторону и отпустили. Как меняются перечисленные в таблице 1 величины при движении маятника на указанных участках его пути? Перечертите таблицу в тетрадь и заполните её.

Таблица 1

Направление движения маятника	Сила упругости $F_{упр}$	Скорость v	Потенциальная энергия $E_п$	Кинетическая энергия $E_к$	Полная механическая энергия $E_{пол}$	
					в реальных условиях (т. е. с трением)	в идеальных условиях (т. е. без трения)
От *B* к *O*						
От *O* к *A*						
От *A* к *O*						
От *O* к *B*						

2. На рисунке 67 изображён шарик на нити, колеблющийся без трения между точками *A* и *B*. Находясь в точке *B*, этот маятник обладает потенциальной энергией, равной 0,01 Дж относительно горизонтали 1, принятой за нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии. Чему равна: а) потенциальная энергия шарика в точках *A* и *O*; б) кинетическая энергия шарика в точках *B*, *O* и *A*; в) полная механическая энергия шарика в точках *B*, *D*, *O*, *C* и *A*?

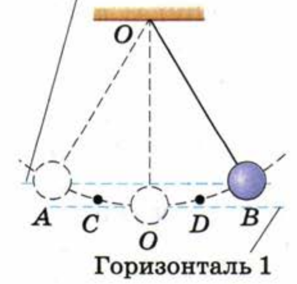


Рис. 67

3. Рассмотрите рисунок 56 и скажите, какие из тел способны совершать: свободные колебания; вынужденные колебания. Ответ обоснуйте.

4. Могут ли происходить: а) вынужденные колебания в колебательной системе; б) свободные колебания в системе, не являющейся колебательной? Приведите примеры.

§ 27 РЕЗОНАНС



Разрушенный Египетский мост

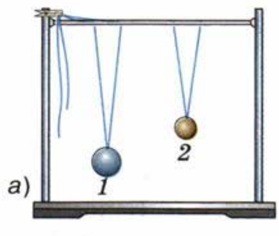
Приведём исторический факт, имеющий непосредственное отношение к теме данного параграфа.

В 1908 г. в Петербурге сильно раскачался и в результате этого обрушился так называемый Египетский мост через реку Фонтанку, когда по нему проходил маршевым шагом (т. е. «в ногу») кавалерийский эскадрон.

Почему именно в описанном случае вынужденные колебания моста достигли такой большой амплитуды? Можно ли было предотвратить аварию?

Для ответа на эти вопросы рассмотрим, как зависит *амплитуда вынужденных колебаний от частоты изменения вынуждающей силы*.

На рисунке 68, *а* изображены два маятника, висящие на общем шнуре. Длина маятника *2* неизменна, этой длине соответствует определённая частота свободных колебаний (т. е. собственная частота маятника). Длину маятника *1* можно менять, подтягивая свободные концы нитей. При изменении длины маятника *1* соответственно меняется его собственная частота.



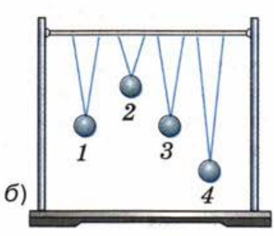


Рис. 68. Демонстрации зависимости амплитуды вынужденных колебаний маятников от частоты изменения вынуждающей силы

Если отклонить маятник *1* от положения равновесия и предоставить его самому себе, то он будет совершать свободные колебания. Это вызовет колебания шнура, в результате чего на маятник *2* через его точки подвеса будет действовать вынуждающая сила, периодически меняющаяся по модулю и направлению с такой же частотой, с какой колеблется маятник *1*. Под действием этой силы маятник *2* начнёт совершать вынужденные колебания.

Если постепенно уменьшать длину маятника *1*, то частота его колебаний, а значит, и частота изменения вынуждающей силы, действующей на маятник *2*, будет увеличиваться,



Египетский мост, построенный заново в 1954—1956 гг.

приближаясь к собственной частоте маятника *2*. При этом амплитуда *установившихся вынужденных колебаний* маятника *2* будет возрастать. Она достигнет наибольшего значения, когда длины маятников сравняются, т. е. когда частота ν вынуждающей силы совпадёт с собственной частотой ν_0 маятника *2*. Маятники будут колебаться в одинаковых фазах.

Дальнейшее уменьшение длины маятника *1* приведёт к тому, что частота вынуждающей силы станет больше собственной частоты маятника *2*. При этом амплитуда его колебаний начнёт уменьшаться.

На основании этого опыта можно сделать следующий вывод: **амплитуда установившихся вынужденных колебаний достигает своего наибольшего значения при условии, что частота ν вынуждающей силы равна собственной частоте ν_0 колебательной системы.** В этом заключается явление, называемое ***резонансом.***

Резонанс можно пронаблюдать также на опыте, показанном на рисунке 68, *б*. На нём изображены четыре маятника, подвешенные к общему шнуру. Маятники *1* и *3* имеют одинаковую длину. Под действием свободных колебаний маятника *3* остальные маятники совершают вынужденные колебания. При этом амплитуда колебаний маятника *1* значительно больше амплитуд маятников *2* и *4*. В данном случае *маятник 1 колеблется в резонанс с маятником 3.*

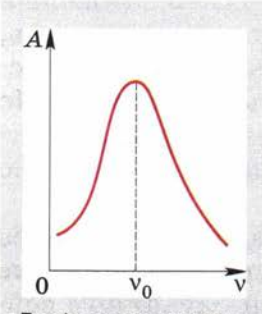


График зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы

Почему амплитуда установившихся колебаний, вызванных вынуждающей силой, достигает наибольшего значения именно при совпадении частоты изменения этой силы с собственной частотой колебательной системы? Дело в том, что в этом случае направление вынуждающей силы в любой момент времени совпадает с направлением движения колеблющегося


При подталкивании качелей в направлении их движения энергия колебательной системы пополняется

тела. Таким образом создаются наиболее благоприятные условия для пополнения энергии колебательной системы за счёт работы вынуждающей силы. Например, чтобы посильнее раскачать качели, мы подталкиваем их таким образом, чтобы направление действующей силы совпадало с направлением движения качелей.

Следует помнить, что понятие резонанса применимо только к вынужденным колебаниям.

Вернёмся теперь к случаю с обрушенным мостом. Очевидно, мост раскачался до большой амплитуды потому, что частота периодически действующей на него вынуждающей силы (ударов копыт идущих «в ногу» лошадей) случайно совпала с собственной частотой этого моста. Аварию можно было бы предотвратить, если бы перед входом на мост была отдана команда идти не «в ногу».

Резонанс играет большую роль в самых разнообразных явлениях, причём в одних — полезную, в других — вредную. Его необходимо учитывать, в частности, в тех случаях, когда с помощью наименьшей периодической силы нужно получить определённый размах вынужденных колебаний. Например, тяжёлый язык большого колокола можно раскачать, действуя сравнительно небольшой силой с частотой, равной собственной частоте языка. Но мы не достигнем желаемого результата, действуя не в резонанс, даже прикладывая большую силу.

Примерами вредного проявления резонанса могут служить слишком сильное раскачивание железнодорожного вагона при случайном совпадении его собственной частоты колебаний на рессорах с частотой ударов колёс на стыках рельсов, сильное раскачивание пароходов на волнах и многие другие явления.

В тех случаях, когда резонанс может нанести ущерб, принимают меры к тому, чтобы не допустить его возникновения. Например, многие заводские станки, отдельные части которых совершают периодические движения, устанавливают на массивном фундаменте, препятствующем возникновению колебаний всего станка.

? Вопросы

1. С какой целью и как проводился опыт с двумя маятниками, изображённый на рисунке 68, *а*? **2.** В чём заключается явление, называемое резонансом? **3.** Какой из маятников, изображённых на рисунке 68, *б*, колеблется в резонанс с маятником *3*? По каким признакам вы это определили? **4.** К каким колебаниям — свободным или вынужденным — применимо понятие резонанса? **5.** Приведите примеры, показывающие, что в одних случаях резонанс может быть полезным явлением, а в других — вредным.

УПРАЖНЕНИЕ 26

1. Маятник *3* (см. рис. 68, *б*) совершает свободные колебания.

   а) Какие колебания — свободные или вынужденные — будут совершать при этом маятники *1*, *2* и *4*?

   б) Каковы собственные частоты маятников *1*, *2* и *4* по сравнению с частотой колебаний маятника *3*?

2. Вода, которую мальчик несёт в ведре, начинает сильно расплёскиваться. Мальчик меняет темп ходьбы (или просто «сбивает ногу»), и расплёскивание прекращается. Почему так происходит?

3. Собственная частота качелей равна 0,5 Гц. Через какие промежутки времени нужно подталкивать их, чтобы раскачать как можно сильнее, действуя относительно небольшой силой?

§ 28 РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В СРЕДЕ. ВОЛНЫ

Рассмотрим опыт, показанный на рисунке 69. Длинную пружину подвешивают на нитях. Ударяют рукой по её левому концу (рис. 69, *а*). От удара несколько витков пружины сближаются, возникает сила упругости,

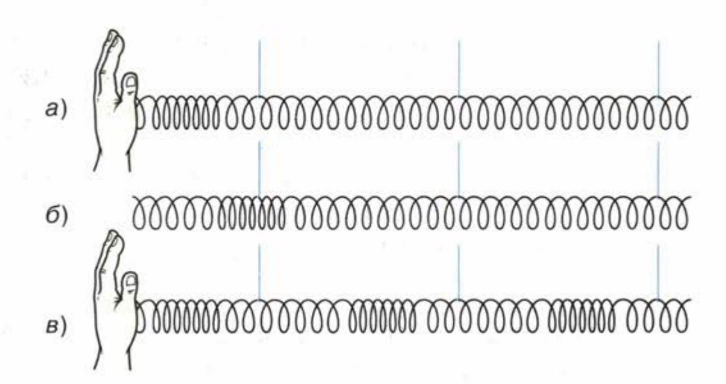


Рис. 69. Возникновение волны в пружине

под действием которой эти витки начинают расходиться. Как маятник проходит в своём движении положение равновесия, так и витки, минуя положение равновесия, будут продолжать расходиться. В результате в этом же месте пружины образуется уже некоторое разрежение (рис. 69, *б*). При ритмичном воздействии витки на конце пружины будут периодически то сближаться, то отходить друг от друга, совершая колебания возле своего положения равновесия. Эти колебания постепенно передадутся от витка к витку вдоль всей пружины. По пружине распространятся сгущения и разрежения витков, как показано на рисунке 69, *в*.

Другими словами, вдоль пружины от её левого конца к правому распространяется *возмущение*, т. е. изменение некоторых физических величин, характеризующих состояние среды. В данном случае это возмущение представляет собой изменение с течением времени силы упругости в пружине, ускорения и скорости движения колеблющихся витков, их смещения от положения равновесия.

Возмущения, распространяющиеся в пространстве, удаляясь от места их возникновения, называются волнами.

В данном определении речь идёт о так называемых ***бегущих волнах***. Основное свойство бегущих волн любой природы заключается в том, что они, распространяясь в пространстве, переносят энергию.

Так, например, колеблющиеся витки пружины обладают энергией. Взаимодействуя с соседними витками, они передают им часть своей энергии и вдоль пружины распространяется механическое возмущение (деформация), т. е. образуется бегущая волна.

Но при этом каждый виток пружины колеблется около своего положения равновесия, и вся пружина остаётся на первоначальном месте.

Таким образом, **в бегущей волне происходит перенос энергии без переноса вещества.**

В данной теме будем рассматривать только *упругие* бегущие волны, частным случаем которых является звук.

Упругие волны — это механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде.

Иначе говоря, образование упругих волн в среде обусловлено возникновением в ней упругих сил, вызванных деформацией. Например, если по какому-нибудь металлическому телу ударить молотком, то в нём возникнет упругая волна.

Помимо упругих существуют и другие виды волн, например электромагнитные волны (см. § 44). Волновые процессы встречаются почти во всех областях физических явлений, поэтому их изучение имеет большое значение.

При возникновении волн в пружине колебания её витков происходили вдоль направления распространения волны в ней (см. рис. 69).

Волны, в которых колебания происходят вдоль направления их распространения, называются продольными волнами.

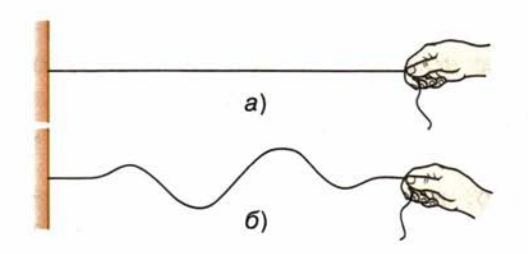


Рис. 70. Возникновение волн в шнуре

Кроме продольных волн существуют и *поперечные волны*. Рассмотрим такой опыт. На рисунке 70, *а* показан длинный резиновый шнур, один конец которого закреплён. Другой конец приводят в колебательное движение в вертикальной плоскости (перпендикулярно горизонтально расположенному шнуру). Благодаря силам упругости, возникающим в шнуре, колебания будут распространяться вдоль шнура. В нём возникают волны (рис. 70, *б*), причём колебания частиц шнура происходят перпендикулярно направлению распространения волн.

Волны, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению их распространения, называются поперечными волнами.

Движение частиц среды, в которой образуются как поперечные, так и продольные волны, можно наглядно продемонстрировать с помощью волновой машины (рис. 71). На рисунке 71, *а* показана поперечная волна, а на рисунке 71, *б* — продольная. Обе волны распространяются в горизонтальном направлении.

На волновой машине представлен только один ряд шариков. Но, наблюдая за их движением, можно понять, как распространяются волны в сплошных средах, протяжённых во

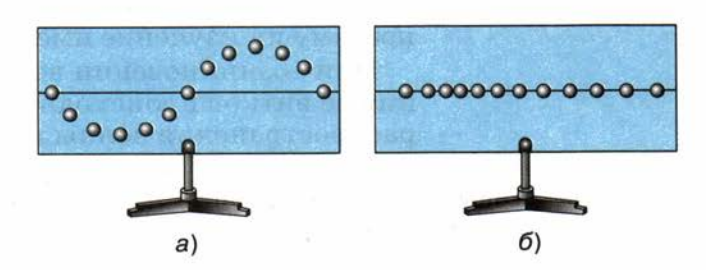


Рис. 71. Поперечная (*а*) и продольная (*б*) волны

всех трёх направлениях (например, в некотором объёме твёрдого, жидкого или газообразного вещества).

Для этого представьте себе, что каждый шарик является частью вертикального слоя вещества, расположенного перпендикулярно к плоскости рисунка. Из рисунка 71, *а* видно, что при распространении поперечной волны эти слои, подобно шарикам, будут *сдвигаться* друг относительно друга, совершая колебания в вертикальном направлении. Поэтому *поперечные механические волны являются волнами сдвига*.

А продольные волны, как видно из рисунка 71, *б*, — это волны сжатия и разрежения. В этом случае деформация слоёв среды состоит в изменении их плотности, так что продольные волны представляют собой чередующиеся уплотнения и разрежения.

Известно, что упругие силы при сдвиге слоёв возникают только в твёрдых телах. В жидкостях и газах смежные слои свободно скользят друг по другу без появления противодействующих упругих сил. Раз нет упругих сил, то и образование упругих волн в жидкостях и газах невозможно. Поэтому поперечные волны могут распространяться только в твёрдых телах.

При сжатии и разрежении (т. е. при изменении объёма участков тела) упругие силы возникают как в твёрдых телах, так и в жидкостях и газах. Поэтому продольные волны могут распространяться в любой среде — твёрдой, жидкой и газообразной.



1. Что называется волнами? **2.** В чём заключается основное свойство бегущих волн любой природы? Происходит ли в бегущей волне перенос вещества? **3.** Что такое упругие волны? **4.** Приведите пример волн, не относящихся к упругим. **5.** Какие волны называются продольными; поперечными? Приведите примеры. **6.** Какие волны — поперечные или продольные — являются волнами сдвига; волнами сжатия и разрежения? **7.** Почему поперечные волны не распространяются в жидких и газообразных средах?

§ 29 ДЛИНА ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН

Рассмотрим более подробно процесс передачи колебаний от точки к точке при распространении поперечной волны. Для этого обратимся к рисунку 72, на котором показаны различные стадии процесса распространения поперечной волны через промежутки времени, равные $\frac{1}{4}T$.

На рисунке 72, *а* изображена цепочка пронумерованных шариков. Это модель: шарики символизируют частицы среды. Будем считать, что между шариками, как и между частицами среды, существуют силы взаимодействия, в частности при небольшом удалении шариков друг от друга возникает сила притяжения.

Если привести первый шарик в колебательное движение, т. е. заставить его двигаться вверх и вниз от положения равновесия, то бла-

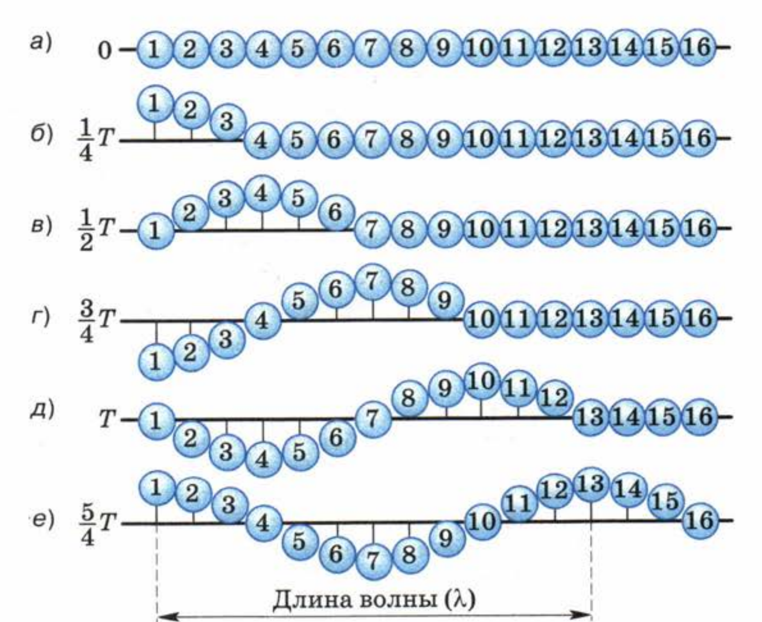


Рис. 72. Схема процесса распространения в пространстве поперечной волны

годаря силам взаимодействия каждый шарик в цепочке будет повторять движение первого, но с некоторым запаздыванием (сдвигом фаз). Это запаздывание будет тем больше, чем дальше от первого шарика находится данный шарик. Так, например, видно, что четвёртый шарик отстаёт от первого на $\frac{1}{4}$ колебания (рис. 72, *б*). Ведь когда первый шарик прошёл $\frac{1}{4}$ часть пути полного колебания, максимально отклонившись вверх, четвёртый шарик только начинает движение из положения равновесия. Движение седьмого шарика отстаёт от движения первого на $\frac{1}{2}$ колебания (рис. 72, *в*), десятого — на $\frac{3}{4}$ колебания (рис. 72, *г*). Тринадцатый шарик отстаёт от первого на одно полное колебание (рис. 72, *д*), т. е. находится с ним в одинаковых фазах. Движения этих двух шариков совершенно одинаковы (рис. 72, *е*).

Расстояние между ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах, называется длиной волны.

Длина волны обозначается греческой буквой λ («ламбда»). Расстояние между первым и тринадцатым шариками (см. рис. 72, *е*), вторым и четырнадцатым, третьим и пятнадцатым и так далее, т. е. между всеми ближайшими друг к другу шариками, колеблющимися в одинаковых фазах, будет равно длине волны λ.

Из рисунка 72 видно, что колебательный процесс распространился от первого шарика до тринадцатого, т. е. на расстояние, равное длине волны λ, за то же время, за которое первый шарик совершил одно полное колебание, т. е. за период колебаний T.

$\lambda = vT$

Значит,

$$\lambda = vT,$$

где v — скорость волны.

Поскольку период колебаний связан с их частотой зависимостью $T = \frac{1}{\nu}$, то длина волны может быть выражена через скорость волны и частоту:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$

$v = \frac{\lambda}{T}$

$v = \lambda\nu$

Таким образом, длина волны зависит от частоты (или периода) колебаний источника, порождающего эту волну, и от скорости распространения волны.

Из формул для определения длины волны можно выразить скорость волны:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad \text{и} \quad v = \lambda\nu.$$

Формулы для нахождения скорости волны справедливы как для поперечных, так и для продольных волн. Длину волны λ при распространении продольных волн можно представить с помощью рисунка 73. На нём изображена (в разрезе) труба с поршнем. Поршень совершает колебания с небольшой амплитудой вдоль трубы. Его движения передаются прилегающим к нему слоям воздуха, заполняющего трубу. Колебательный процесс постепенно рас-



Рис. 73. Образование продольной волны в трубе при периодическом сжатии и разрежении воздуха поршнем

пространяется вправо, образуя в воздухе разрежения и сгущения. На рисунке даны примеры двух отрезков, соответствующих длине волны λ. Очевидно, что точки *1* и *2* являются ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах. То же самое можно сказать про точки *3* и *4*.


Вопросы

1. Что называется длиной волны? **2.** За какое время колебательный процесс распространяется на расстояние, равное длине волны? **3.** По каким формулам можно рассчитать длину волны и скорость распространения поперечных и продольных волн? **4.** Расстояние между какими точками равно длине волны, изображённой на рисунке 73?

УПРАЖНЕНИЕ 27

1. С какой скоростью распространяется волна в океане, если длина волны равна 270 м, а период колебаний равен 13,5 с?
2. Определите длину волны при частоте 200 Гц, если скорость распространения волны равна 340 м/с.
3. Лодка качается на волнах, распространяющихся со скоростью 1,5 м/с. Расстояние между двумя ближайшими гребнями волн равно 6 м. Определите период колебаний лодки.

§ 30 ИСТОЧНИКИ ЗВУКА. ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Полученные знания о колебаниях и волнах позволяют нам перейти к рассмотрению звуковых явлений.

Мир окружающих нас звуков разнообразен — голоса людей и музыка, пение птиц и жужжание пчёл, гром во время грозы и шум леса на ветру, звук проезжающих автомобилей, самолётов и т. д. *Источниками звука* являются колеблющиеся тела. В этом можно убедиться на простых опытах. Рассмотрим их.



Рис. 74. Пример источника звука

На рисунке 74 изображена укреплённая в тисках упругая металлическая линейка. Если её свободную часть, длина которой подобрана определённым образом, привести в колебательное движение (крайние положения колеблющейся линейки показаны штриховыми линия-



Рис. 75. Звучащая струна, концы которой закреплены, совершает колебания

ми), то линейка будет издавать звук. В данном случае колебания источника звука очевидны.

Теперь обратимся к рисунку 75. На нём изображена звучащая струна, концы которой закреплены. Размытые очертания этой струны и кажущееся утолщение в середине свидетельствуют о том, что струна колеблется. Если к звучащей струне приблизить конец бумажной полоски, то полоска будет подпрыгивать от толчков струны. Пока струна колеблется, слышен звук; остановим струну, и звук прекращается.

Прибор, изображённый на рисунке 76, называется ***камертоном***. Он представляет собой изогнутый металлический стержень на ножке. В данном случае камертон укреплён на резонаторном ящике (о назначении которого вы узнаете из § 40).

Если по камертону ударить мягким молоточком или провести по нему смычком, то камертон зазвучит. Поднесём к звучащему камертону лёгкий шарик (стеклянную бусинку), подвешенный на нитке, — шарик будет отскакивать от камертона, свидетельствуя о колебаниях его ветвей.

На рисунке 77 показано, как можно «записать» колебания камертона с малой (порядка 16 Гц) собственной частотой и большой амплитудой колебаний. К концу одной ветви камер-



Рис. 76. Обнаружение колебаний ветвей звучащего камертона

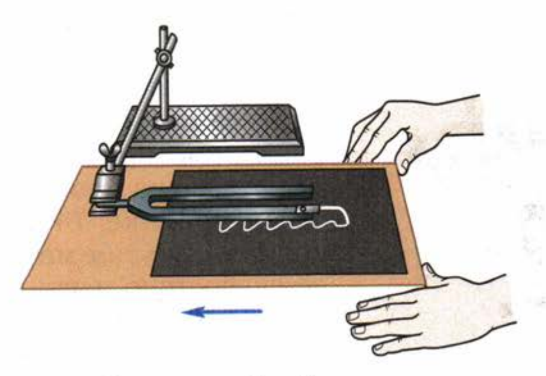
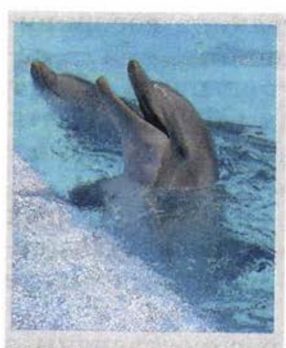


Рис. 77. Запись колебаний ветви камертона



Дельфины излучают и используют ультразвук для общения друг с другом, предупреждения сородичей об опасности, обнаружении косяков рыбы



Для летучих мышей ультразвук является средством обнаружения добычи



Медузы чувствуют приближение шторма благодаря улавливанию создаваемой им инфразвуковой волны

тона привинчена тонкая и узкая металлическая полоска, оканчивающаяся остриём. Остриё загнуто вниз и слегка касается лежащей на столе закопчённой стеклянной пластинки. При быстром перемещении пластинки под колеблющимися ветвями остриё оставляет на ней след в виде волнообразной линии.

Волнообразная линия, прочерченная на пластинке остриём, очень близка к синусоиде. Таким образом, можно считать, что каждая ветвь звучащего камертона совершает гармонические колебания.

Различные опыты свидетельствуют о том, что любой источник звука обязательно колеблется (хотя чаще всего эти колебания незаметны для глаза). Например, звуки голосов людей и многих животных возникают в результате колебаний их голосовых связок, звучание духовых музыкальных инструментов, звук сирены, свист ветра, шелест листьев, раскаты грома обусловлены колебаниями масс воздуха.

Но далеко не всякое колеблющееся тело является источником звука. Например, не издаёт звука колеблющийся грузик, подвешенный на нити или пружине. Перестанет звучать и металлическая линейка, изображённая на рисунке 74, если переместить её в тисках вверх и тем самым удлинить свободный конец настолько, чтобы частота его колебаний стала меньше 16 Гц.

Исследования показали, что человеческое ухо способно воспринимать как звук механические колебания с частотой в пределах от 16 до 20 000 Гц (передающиеся обычно через воздух). Поэтому колебания этого диапазона частот называются ***звуковыми***.

Следует отметить, что указанные границы звукового диапазона условны, так как зависят от возраста людей и индивидуальных особенностей их слухового аппарата. Обычно с воз-



Рис. 78. Использование ультразвуковых колебаний для измерения глубины моря

растом верхняя частотная граница воспринимаемых звуков значительно понижается — некоторые пожилые люди могут слышать звуки с частотами, не превышающими 6000 Гц. Дети же, наоборот, могут воспринимать звуки, частота которых несколько больше 20 000 Гц.

Механические колебания, частота которых превышает 20 000 Гц, называются *ультразвуковыми*, а колебания с частотами менее 16 Гц — *инфразвуковыми*.

Ультразвук и инфразвук распространены в природе так же широко, как и волны звукового диапазона. Их излучают и используют для своих «переговоров» дельфины, летучие мыши и некоторые другие живые существа.

Ультразвук находит широкое применение в технике. Например, направленные узкие пучки ультразвука применяются для измерения глубины моря (рис. 78). Для этой цели на дне судна помещают излучатель и приёмник ультразвука. Излучатель даёт короткие сигналы, которые доходят до дна и, отражаясь от него, достигают приёмника. Моменты излучения и приёма сигнала регистрируются. Таким образом, за время t, которое проходит с момента отправления сигнала до момента его приёма, сигнал, распространяющийся со скоростью v, проходит путь, равный удвоенной глубине моря, т. е. $2h$:

$$2h = vt.$$

Отсюда легко вычислить глубину моря:

$$h = \frac{vt}{2}.$$

Описанный метод определения расстояния до объекта называется ***эхолокацией***.



1. Расскажите о ходе опытов, изображённых на рисунках 74—77. Какой вывод из них следует? **2.** Что является источниками звука? **3.** Механические колебания каких частот называются звуковыми и почему? **4.** Какие колебания называются ультразвуковыми; инфразвуковыми? **5.** Расскажите об измерении глубины моря методом эхолокации.

УПРАЖНЕНИЕ 28

Звук от взмахов крыльев летящего комара мы слышим, а летящей птицы — нет. Почему?

§ 31 ВЫСОТА, ТЕМБР И ГРОМКОСТЬ ЗВУКА

Обратимся ещё раз к опыту, изображённому на рисунке 74. Как уже говорилось, свободная часть линейки создаёт звук только в том случае, если она колеблется с частотой, не меньшей чем 16 Гц. Переместим линейку в тисках вниз (укоротив тем самым верхнюю часть) и приведём её в колебательное движение. Заметим, что частота колебаний линейки увеличилась, а издаваемый ею звук стал выше. Продолжая периодически укорачивать колеблющуюся часть линейки, убедимся в том, что с увеличением частоты колебаний звук повышается.

Проверим этот вывод на другом опыте. Возьмём зубчатый диск (рис. 79, *а*), с помощью специального устройства приведём его во вращение и прикоснёмся к зубчатому краю тонкой картонной пластинкой (рис. 79, *б*). Под воздействием зубьев вращающегося диска пластинка начнёт совершать вынужденные колебания, в результате чего мы услышим звук. Увеличим скорость вращения диска, и пластинка станет колебаться чаще, а издаваемый ею звук будет выше.

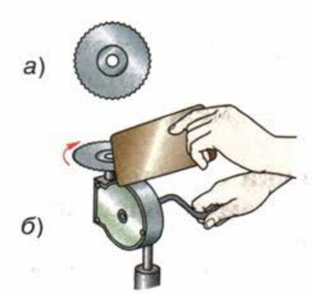


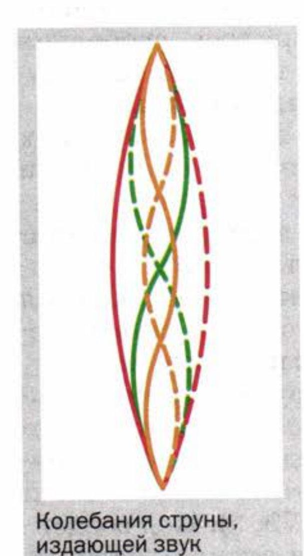
Рис. 79. Исследование зависимости высоты звука от частоты колебаний источника

На основании описанного опыта можно заключить, что **высота звука зависит от частоты колебаний: чем больше частота колебаний источника звука, тем выше издаваемый им звук.**

Напомним, что ветви камертона совершают гармонические (синусоидальные) колебания, которые являются самым простым видом колебаний. Таким колебаниям присуща только одна строго определённая частота. Звук камертона является ***чистым тоном***.

Чистым тоном называется звук источника, совершающего гармонические колебания одной частоты.

Звуки от других источников (например, звуки различных музыкальных инструментов, голоса людей, звук сирены и многие другие) представляют собой совокупность гармонических колебаний разных частот, т. е. совокупность чистых тонов.


Колебания струны, издающей звук основного тона и двух обертонов

Самая низкая (т. е. самая малая) частота такого сложного звука называется ***основной частотой***, а соответствующий ей звук определённой высоты — ***основным тоном*** (иногда его называют просто *тоном*). *Высота сложного звука определяется именно высотой его основного тона.*

Все остальные тоны сложного звука называются ***обертонами***. Частоты всех обертонов данного звука в целое число раз больше частоты́ его основного тона (поэтому их называют также *высшими гармоническими тонами*).

Обертоны определяют ***тембр*** звука, т. е. такое его качество, которое позволяет нам отличать звуки одних источников от звуков других. Например, мы легко отличаем звук рояля от звука скрипки даже в том случае, если эти звуки имеют одинаковую высоту, т. е. одну и ту же частоту основного тона. Отличие же этих звуков обусловлено разным набором обертонов (совокупность обертонов различных источников может отличаться количеством обертонов, их амплитудами, сдвигом фаз между ними, спектром частот).

Таким образом, **высота звука определяется частотой его основного тона: чем больше частота основного тона, тем выше звук.**

Тембр звука определяется совокупностью его обертонов.


Тембры звуков рояля и скрипки отличаются набором обертонов

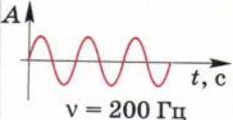
Чтобы выяснить, от чего зависит громкость звука, вернёмся к опыту, изображённому на рисунке 76. К одной ветви камертона подводят

вплотную маленький висящий на нити шарик, а по другой слегка ударяют молоточком. Обе ветви камертона приходят в колебательное движение. Слышен негромкий звук. Шарик отскакивает от колеблющейся ветви на небольшое расстояние. Затем камертон глушат и снова ударяют по нему, но гораздо сильнее, чем в первый раз. Теперь камертон звучит громче, а шарик отскакивает на большее расстояние, что свидетельствует о большей амплитуде колебаний ветвей.

Этот и многие другие опыты позволяют сделать вывод о том, что **громкость звука зависит от амплитуды колебаний: чем больше амплитуда колебаний, тем громче звук.**

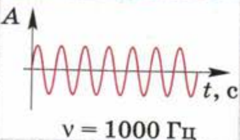
В рассмотренном опыте частоты колебаний обоих звуков — тихого и громкого — одинаковы, так как их источником является один и тот же камертон. Но если сравнить звуки *разных частот*, то кроме амплитуды колебаний пришлось бы учитывать ещё один фактор, влияющий на громкость. Дело в том, что чувствительность человеческого уха к звукам разной частоты различна. *При одинаковых амплитудах как более громкие воспринимаются звуки, частоты которых лежат в пределах от* 1000 *до* 5000 Гц. Поэтому, например, высокий женский голос с частотой 1000 Гц будет для нашего уха громче низкого мужского с частотой 200 Гц, даже если амплитуды колебаний голосовых связок в обоих случаях одинаковы. *Громкость звука зависит также от его длительности и от индивидуальных особенностей слушателя.*





$\nu = 200$ Гц





$\nu = 1000$ Гц

При равных амплитудах женский голос, имеющий бо́льшую частоту, чем мужской, воспринимается как более громкий

Громкость звука — это субъективное качество слухового ощущения, позволяющее располагать все звуки по шкале от тихих до громких.

Единица громкости звука называется *сон*.

В практических задачах громкость звука принято характеризовать *уровнем звукового*

давления, измеряемым в *белах* **(Б)** или *децибелах* **(дБ)**, составляющих десятую часть бела.

Например, звуку, возникающему при листании газеты, соответствует уровень звукового давления порядка 20 дБ, звуку звонка будильника — примерно 80 дБ, двигателя самолёта — порядка 130 дБ (такой громкий звук вызывает у человека болевое ощущение).

Систематическое воздействие на человека громких звуков, особенно шумов (совокупности звуков разной громкости, высоты тона, тембра), неблагоприятно отражается на его здоровье.

В шумных районах у многих людей появляются симптомы шумовой болезни: повышенная нервная возбудимость, быстрая утомляемость, повышенное артериальное давление. Поэтому в больших городах приходится принимать специальные меры для уменьшения шумов, например запрещать звуковые сигналы автомобилей.

? Вопросы

1. С какой целью проводились опыты, изображённые на рисунках 74 и 79? Какой был сделан вывод по результатам этих опытов? **2.** Как на опыте удостовериться в том, что из двух камертонов более высокий звук издаёт тот, у которого больше собственная частота? (Часто́ты на камертонах не указаны.) **3*.** От чего зависит высота звука? **4.** Как изменится громкость звука, если уменьшить амплитуду колебаний его источника? **5.** Звук какой частоты — 500 Гц или 3000 Гц — человеческое ухо воспримет как более громкий при одинаковых амплитудах колебаний источников этих звуков? **6.** От чего зависит громкость звука? **7.** Как отражается на здоровье человека систематическое действие громких звуков?

УПРАЖНЕНИЕ 29

1. Какое насекомое чаще машет крыльями в полёте — шмель, комар или муха? Почему вы так думаете?

2. Зубья вращающейся циркулярной пилы создают в воздухе звуковую волну. Как изменится высота звука, издаваемого пилой при её холостом ходе, если на ней начать распиливать толстую доску из плотной древесины? Почему?

3. Известно, что чем туже натянута струна на гитаре, тем более высокий звук она издаёт. Как изменится высота звучания гитарных струн при значительном повышении температуры окружающего воздуха? Ответ поясните.

§ 32 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Мы воспринимаем звуки, находясь на расстоянии от их источников. Обычно звук доходит до нас по воздуху. Воздух является упругой средой, передающей звук.

Если между источником и приёмником удалить звукопередающую среду, то звук распространяться не будет и, следовательно, приёмник не воспримет его. Продемонстрируем это на опыте.

Поместим под колокол воздушного насоса часы-будильник (рис. 80). Пока в колоколе находится воздух, звук звонка слышен ясно. При откачивании воздуха из-под колокола звук постепенно слабеет и, наконец, становится неслышимым. Без передающей среды колебания тарелки звонка не могут распространяться, и звук не доходит до нашего уха. Впустим под колокол воздух и снова услышим звон.

Хорошо проводят звуки упругие вещества, например металлы, древесина, жидкости, газы.

Положим на один конец деревянной доски карманные часы, а сами отойдём к другому концу. Приложив ухо к доске, услышим ход часов.



Рис. 80. Опыт, доказывающий, что в пространстве, где нет вещественной среды, звук не распространяется

Привяжем к металлической ложке бечёвку. Конец бечёвки приложим к уху. Ударяя по ложке, услышим сильный звук. Ещё более сильный звук услышим, если бечёвку заменим проволокой.

Мягкие и пористые тела — плохие проводники звука. Чтобы защитить какое-нибудь по-

мещение от проникновения посторонних звуков, стены, пол и потолок прокладывают прослойками из звукопоглощающих материалов. В качестве прослоек используют войлок, прессованную пробку, пористые камни, различные синтетические материалы (например, пенопласт), изготовленные на основе вспененных полимеров. Звук в таких прослойках быстро затухает.

Жидкости хорошо проводят звук. Рыбы, например, хорошо слышат шаги и голоса на берегу, это известно опытным рыболовам.

Итак, *звук распространяется в любой упругой среде — твёрдой, жидкой и газообразной, но не может распространяться в пространстве, где нет вещества.*

Колебания источника создают в окружающей его среде упругую волну звуковой частоты. Волна, достигая уха, воздействует на барабанную перепонку, заставляя её колебаться с частотой, соответствующей частоте источника звука. Дрожания барабанной перепонки передаются посредством системы косточек окончаниям слухового нерва, раздражают их и тем вызывают ощущение звука.

Напомним, что в газах и жидкостях могут существовать только продольные упругие волны. Звук в воздухе, например, передаётся продольными волнами, т. е. чередующимися сгущениями и разрежениями воздуха, идущими от источника звука.



При стрельбе из ружья звук выстрела слышен позже, чем видно появление огня и дыма

Звуковая волна, как и любые другие механические волны, распространяется в пространстве не мгновенно, а с определённой скоростью. В этом можно убедиться, например, наблюдая издалека за стрельбой из ружья. Сначала видим огонь и дым, а потом через некоторое время слышим звук выстрела. Дым появляется в то же время, когда происходит первое звуковое колебание. Измерив промежуток

времени t между моментом возникновения звука (момент появления дыма) и моментом, когда он доходит до уха, можно определить скорость распространения звука:

$$v = \frac{s}{t}.$$

Измерения показывают, что скорость звука в воздухе при 0 °C и нормальном атмосферном давлении равна 332 м/с.

Скорость звука в газах тем больше, чем выше их температура. Например, при 20 °C скорость звука в воздухе равна 343 м/с, при 60 °C — 366 м/с, при 100 °C — 387 м/с. Объясняется это тем, что с повышением температуры возрастает упругость газов, а чем больше упругие силы, возникающие в среде при её деформации, тем больше подвижность частиц и тем быстрее передаются колебания от одной точки к другой.

Скорость звука зависит также от свойств среды, в которой распространяется звук. Например, при 0 °C скорость звука в водороде равна 1284 м/с, а в углекислом газе — 259 м/с, так как молекулы водорода менее массивны и менее инертны.

В настоящее время скорость звука может быть измерена в любой среде. В таблице 2 приведены скорости звука в некоторых средах.

Таблица 2. Скорость звука в различных средах (t = 20 °C)

Среда	Скорость, м/с	Среда	Скорость, м/с
Вода	1483	Дерево (ель)	5000
Гранит	3850	Сталь	5000—6100
Медь	4700	Стекло	5500

Молекулы в жидкостях и твёрдых телах расположены ближе друг к другу и сильнее взаимодействуют, чем молекулы газов. Поэтому скорость звука в жидких и твёрдых средах больше, чем в газообразных.

Поскольку звук — это волна, то для определения скорости звука, помимо формулы $v = \frac{s}{t}$, можно пользоваться известными вам формулами: $v = \frac{\lambda}{T}$ и $v = \nu\lambda$. При решении задач скорость звука в воздухе обычно считают равной 340 м/с.

? Вопросы

1. С какой целью ставят опыт, изображённый на рисунке 80? Опишите, как этот опыт проводится и какой вывод из него следует. **2.** Может ли звук распространяться в газах, жидкостях, твёрдых телах? Ответы подтвердите примерами. **3.** Какие тела лучше проводят звук — упругие или пористые? Приведите примеры упругих и пористых тел. **4.** Какую волну — продольную или поперечную — представляет собой звук, распространяющийся в воздухе; в воде? **5.** Приведите пример, показывающий, что звуковая волна распространяется не мгновенно, а с определённой скоростью.

УПРАЖНЕНИЕ 30

1. Может ли звук сильного взрыва на Луне быть слышен на Земле? Ответ обоснуйте.
2. Если к каждому из концов нити привязать по одной половинке мыльницы, то с помощью такого телефона можно переговариваться даже шёпотом, находясь в разных комнатах. Объясните явление.
3. Определите скорость звука в воде, если источник, колеблющийся с периодом 0,002 с, возбуждает в воде волны длиной 2,9 м.
4. Определите длину звуковой волны частотой 725 Гц в воздухе, в воде и в стекле.
5. По одному концу длинной металлической трубы один раз ударили молотком. Будет ли звук от удара распространяться ко второму концу трубы по металлу; по воздуху внутри трубы? Сколько ударов услышит человек, стоящий у другого конца трубы?
6. Наблюдатель, стоящий около прямолинейного участка железной дороги, увидел пар над свистком идущего вдали паровоза. Через 2 с после появления пара он услышал звук свистка, а через 34 с паровоз прошёл мимо наблюдателя. Определите скорость движения паровоза.

§ 33 ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА. ЗВУКОВОЙ РЕЗОНАНС

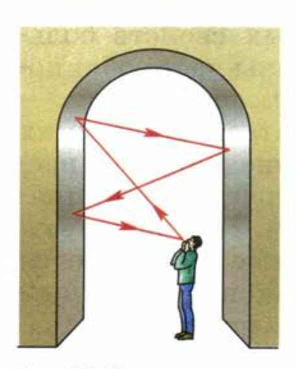


Рис. 81. Отражение звуковых волн

Каждый из вас знаком с таким звуковым явлением, как эхо. Эхо образуется в результате отражения звука от различных преград — стен большого пустого помещения, леса, сводов высокой арки в здании (рис. 81).

Но почему мы не слышим эха в небольшой квартире? Ведь и в ней звук должен отражаться от стен, потолка, пола.

Оказывается, эхо слышно лишь в том случае, когда отражённый звук воспринимается отдельно от произнесённого. Для этого нужно, чтобы промежуток времени между воздействием этих двух звуков на барабанную перепонку уха составлял не менее 0,06 с.

Определим, через какое время после произнесённого вами короткого возгласа отражённый от стены звук достигнет вашего уха, если вы стоите на расстоянии 3 м от этой стены.

Звук должен пройти расстояние до стены и обратно, т. е. 6 м, распространяясь со скоростью 340 м/с. На это потребуется время $t = \frac{s}{v}$, т. е.

$$t = \frac{6 \text{ м}}{340 \text{ м/с}} \approx 0{,}02 \text{ с}.$$



В пустом спортивном зале из-за наложения отражённых от разных поверхностей звуковых волн вместо чёткого звука слышен гул

В данном случае интервал между двумя воспринимаемыми вами звуками — произнесённым и отражённым — значительно меньше того, который необходим, чтобы услышать эхо. Кроме того, образованию эха в комнате препятствует находящаяся в ней мебель, шторы и другие предметы, частично поглощающие отражённый звук. Поэтому в таком помещении речь людей и другие звуки не искажаются эхом и звучат чётко и разборчиво.

Большие полупустые помещения с гладкими стенами, полом и потолком обладают свойством очень хорошо отражать звуковые волны. В та-



Рис. 82. Принцип действия рупора

ком помещении благодаря набеганию предшествующих звуковых волн на последующие получается наложение звуков, и образуется гул. Для улучшения звуковых свойств больших залов и аудиторий их стены часто облицовывают звукопоглощающими материалами.

На свойстве звука отражаться от гладких поверхностей основано действие рупора — расширяющейся трубы обычно круглого или прямоугольного сечения (рис. 82). При использовании рупора звуковые волны не рассеиваются во все стороны, а образуют узконаправленный пучок, за счёт чего мощность звука увеличивается и он распространяется на большее расстояние.



Рис. 83. Пример механического резонанса

Напомним, что при резонансе амплитуда установившихся вынужденных механических колебаний достигает наибольшего значения в том случае, если частота вынуждающей силы совпадает с собственной частотой колебательной системы.

Например, довольно тяжёлый нитяной маятник (рис. 83) можно сильно раскачать, если периодически дуть на него (даже очень слабой струёй) в направлении его движения с частотой, равной его собственной частоте.

Резонанс может быть вызван и действием звуковых волн. Чтобы пронаблюдать это, проделаем следующий опыт. Возьмём два камертона A и B с одинаковыми собственными частотами и поставим их рядом, обратив отверстия ящиков, на которых они укреплены, навстречу друг другу (рис. 84). Ударяя резиновым молоточком по камертону A, приведём его в колебание, а затем приглушим пальцами. Мы услышим звук, издаваемый камертоном B, который отзывается на колебания камертона A подобно тому, как в опытах с маятниками (см. рис. 68, *б*) маятник *1* отзывался на колебания маятника *3*.

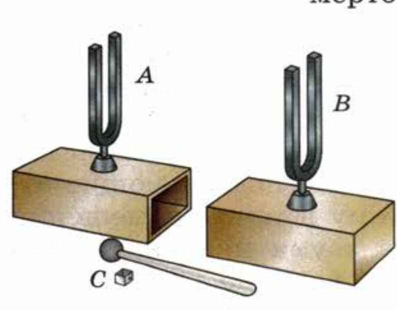


Рис. 84. Оборудование для демонстрации звукового резонанса

Изменим период колебания камертона B, надев на его ножку небольшую муфточку C. Повторив опыт, обнаружим, что теперь камертон B уже не отзывается на колебания камертона A.

Звуковые волны, образованные камертоном A, дойдя до камертона B, возбуждают в нём вынужденные колебания. Поскольку собственные частóты колебаний камертонов одинаковы, то имеет место резонанс: камертон B колеблется с наибольшей возможной амплитудой и издаёт звук. Но при наличии на камертоне B муфты C его собственная частота колебаний меняется, и амплитуда колебаний уменьшается настолько, что звука мы не услышим.

Ящики, на которых установлены камертоны, способствуют усилению звука и наиболее полной передаче энергии от одного камертона к другому. Усиление звука происходит за счёт колебаний самого ящика и особенно столба воздуха в нём. Размеры ящика подбирают таким образом, чтобы собственная частота воздушного столба в нём совпадала с частотой колебаний камертона. При этом столб воздуха колеблется в резонанс с камертоном, т. е. амплитуда его колебаний и соответственно громкость звука достигают наибольших значений.

Камертон, снабжённый таким ящиком (*резонатором*), издаёт более громкий, но менее длительный звук (по закону сохранения энергии).

В музыкальных инструментах роль резонаторов выполняют части их корпусов. Например, в гитаре, скрипке и других подобных им струнных инструментах резонаторами служат деки, которые усиливают издаваемые струнами звуки и придают звучанию инструмента характерную для него окраску — тембр. Тембр звука зависит не только от формы и размера резонатора, но и от того, из какого дерева он изготовлен, и даже от состава лака, покрываю-



Дека гитары служит резонатором

щего его. Тембр определяется также материалом, из которого сделана струна, и тем, гладкая она или витая.

Резонаторы имеются и в голосовом аппарате человека. Источники звука в голосовом аппарате — голосовые связки. Они приходят в колебание благодаря продуванию воздуха из лёгких и возбуждают звук, основной тон которого зависит от их натяжения. Этот звук богат обертонами. Гортань усиливает те из обертонов, частота колебаний которых близка к её собственной частоте. Дальше звуковые волны попадают в полость рта. Для произнесения каждой гласной необходимо особое положение губ, языка и определённая форма резонаторной полости во рту.



1. Какова причина образования эха? Почему эхо не возникает в маленькой, заполненной мебелью комнате? Ответы обоснуйте. **2.** Как можно улучшить звуковые свойства большого зала? **3.** Почему при использовании рупора звук распространяется на большее расстояние? **4.** Приведите примеры проявления звукового резонанса, не упомянутые в тексте параграфа. **5.** Для чего камертоны устанавливают на резонаторных ящиках? Каково назначение резонаторов, применяемых в музыкальных инструментах? **6.** Что является источником голоса человека?

ЗАДАНИЕ

- Придумайте, с помощью каких предметов (кроме камертонов на резонаторных ящиках) можно продемонстрировать явление звукового резонанса. Проделайте придуманный вами опыт, опишите ваши действия и наблюдаемые результаты.

ИТОГИ ГЛАВЫ

САМОЕ ГЛАВНОЕ

Ниже даны физические понятия и их определения. Последовательность изложения определений не соответствует последовательности понятий.

Перенесите в тетрадь названия понятий и в квадратные скобки впишите порядковый номер определения, соответствующего данному понятию.

- **Периодические механические колебания [ ];**
- **свободные колебания [ ];**
- **колебательные системы [ ];**
- **собственные колебания [ ];**
- **вынужденные колебания [ ];**
- **резонанс [ ];**
- **волны [ ];**
- **звук [ ].**

1. Колебания, происходящие только благодаря начальному запасу энергии.
2. Повторяющиеся через равные промежутки времени движения, при которых тело многократно и в разных направлениях проходит положение равновесия.
3. Системы тел, которые способны совершать свободные колебания.
4. Возмущения, распространяющиеся в пространстве, удаляясь от места их возникновения.
5. Упругие волны с диапазоном частот от 16 до 20 000 Гц.
6. Свободные колебания в отсутствие трения и сопротивления воздуха.
7. Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний системы при приближении частоты вынуждающей силы к собственной частоте этой системы.
8. Колебания, совершаемые телом под действием внешней периодически изменяющейся силы.

ПРОВЕРЬ СЕБЯ

1. Взаимосвязь между периодом и частотой колебаний представлена уравнением

   А. $\lambda = \frac{v}{\nu}$ Б. $T = \frac{t}{N}$ В. $T = \frac{\lambda}{v}$ Г. $\nu = \frac{1}{T}$

2. Все единицы соответствуют расположенным над ними физическим величинам только в строке с номером

Физические величины	T	t_N	ν	λ	v	№ строки
Единицы физических величин (СИ)	с	с	Гц	Н	м/с	1
	с	с	Гц	м	Гц	2
	Гц	с	Гц	м	м/с	3
	с	с	Гц	м	м/с	4

3. В процессе колебаний маятника ускорение его движения
   А. постоянно
   Б. меняется только по направлению
   В. достигает наибольшего значения в точке равновесия маятника
   Г. всегда направлено к положению равновесия

4. Звук тем выше, чем больше
   А. частота колебаний
   Б. период колебаний
   В. амплитуда колебаний
   Г. громкость звука



Выполните задания, предложенные в электронном приложении.

Глава 3

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 34 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Из курса физики 8 класса вы знаете, что магнитное поле порождается электрическим током. Оно существует, например, вокруг металлического проводника с током. При этом ток создаётся электронами, направленно движущимися вдоль проводника. Магнитное поле возникает и в том случае, когда ток проходит через раствор электролита, где носителями зарядов являются положительно и отрицательно заряженные ионы, движущиеся навстречу друг другу.

Поскольку электрический ток — это направленное движение заряженных частиц, то можно сказать, что *магнитное поле создаётся движущимися заряженными частицами, как положительными, так и отрицательными*.

Напомним, что, согласно гипотезе Ампера, в атомах и молекулах вещества в результате движения электронов возникают кольцевые токи.

На рисунке 85 показано, что в постоянных магнитах эти элементарные кольцевые токи ориентированы одинаково. Поэтому магнитные поля, образующиеся вокруг каждого такого тока, имеют одинаковые направления. Эти поля усиливают друг друга, создавая поле внутри и вокруг магнита.

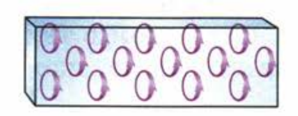


Рис. 85. Иллюстрация гипотезы Ампера

Для наглядного представления магнитного поля используются магнитные линии (их на-



Рис. 86. В любой точке магнитной линии касательная к ней совпадает с осью магнитной стрелки, помещённой в эту точку

зывают также линиями магнитного поля)[1]. Напомним, что *магнитные линии — это воображаемые линии, вдоль которых расположились бы маленькие магнитные стрелки, помещённые в магнитное поле*.

Магнитную линию можно провести через любую точку пространства, в котором существует магнитное поле.

На рисунке 86 показано, что магнитная линия (как прямолинейная, так и криволинейная) проводится так, чтобы в любой точке этой линии касательная к ней совпадала с осью магнитной стрелки, помещённой в эту точку.

Магнитные линии являются замкнутыми. Например, картина магнитных линий прямого проводника с током представляет собой концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной проводнику.

Из рисунка 86 видно, что за направление магнитной линии в какой-либо её точке условно принимают направление, которое указывает северный полюс магнитной стрелки, помещённой в эту точку.

В тех областях пространства, где магнитное поле более сильное, магнитные линии изображают ближе друг к другу, т. е. гуще, чем в тех местах, где поле слабее. Например, поле, изо-

---

[1] В § 37 будет дано более точное название и определение этих линий.



Рис. 87. Магнитные линии ближе друг к другу в тех местах, где магнитное поле сильнее

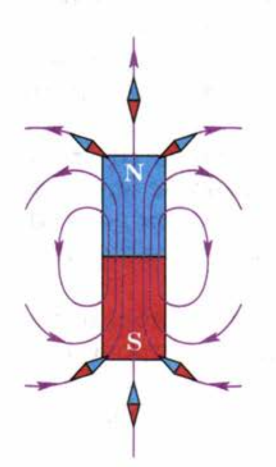


Рис. 88. Картина магнитного поля постоянного полосового магнита

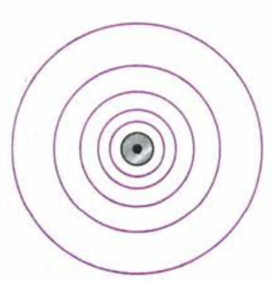


Рис. 89. Магнитные линии магнитного поля, созданного прямолинейным проводником с током

бражённое на рисунке 87, слева сильнее, чем справа.

Таким образом, по *картине магнитных линий можно судить не только о направлении, но и о величине магнитного поля* (т. е. о том, в каких точках пространства поле действует на магнитную стрелку с большей силой, а в каких — с меньшей).

Рассмотрим картину линий магнитного поля постоянного полосового магнита (рис. 88). Из курса физики 8 класса вы знаете, что магнитные линии выходят из северного полюса магнита и входят в южный. Внутри магнита они направлены от южного полюса к северному. Магнитные линии не имеют ни начала, ни конца: они либо замкнуты, либо, как средняя линия на рисунке, идут из бесконечности в бесконечность.

Вне магнита магнитные линии расположены наиболее густо у его полюсов. Значит, возле полюсов поле самое сильное, а по мере удаления от полюсов оно ослабевает. Чем ближе к полюсу магнита расположена магнитная стрелка, тем с большей по модулю силой действует на неё поле магнита. Поскольку магнитные линии искривлены, то направление силы, с которой поле действует на стрелку, тоже меняется от точки к точке.

Таким образом, **сила, с которой поле полосового магнита действует на помещённую в это поле магнитную стрелку, в разных точках поля может быть различной как по модулю, так и по направлению.**

Такое поле называется ***неоднородным***. *Линии неоднородного магнитного поля искривлены, их густота меняется от точки к точке.*

Ещё одним примером неоднородного магнитного поля может служить поле вокруг прямолинейного проводника с током. На рисунке 89 изображён участок такого проводника, расположенный перпендикулярно плоскос-

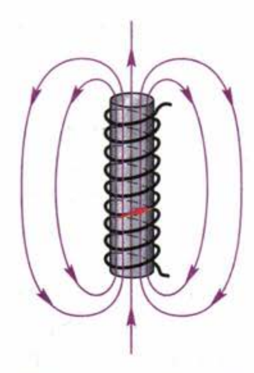


Рис. 90. Магнитное поле соленоида

ти чертежа. Кружочком обозначено сечение проводника. Точка означает, что ток направлен из-за чертежа к нам, как будто мы видим остриё стрелы, указывающей направление тока (ток, направленный от нас за чертёж, обозначают крестиком, как будто мы видим хвостовое оперение стрелы, направленной по току).

Из этого рисунка видно, что магнитные линии поля, созданного прямолинейным проводником с током, представляют собой концентрические окружности, расстояние между которыми увеличивается по мере удаления от проводника.

В некоторой ограниченной области пространства можно создать ***однородное*** магнитное поле, т. е. *поле, в любой точке которого сила действия на магнитную стрелку одинакова по модулю и направлению.*

На рисунке 90 показано магнитное поле, возникающее внутри соленоида — проволочной цилиндрической катушки с током. Поле внутри соленоида можно считать однородным, если длина соленоида значительно больше его диаметра (вне соленоида поле неоднородно, его магнитные линии расположены примерно так же, как у полосового магнита). Из этого рисунка видно, что *магнитные линии однородного магнитного поля параллельны друг другу и расположены с одинаковой густотой.*

Однородным является также поле внутри постоянного полосового магнита в центральной его части (см. рис. 88).

Для изображения магнитного поля пользуются следующим приёмом. Если линии однородного магнитного поля расположены перпендикулярно к плоскости чертежа и направлены от нас за чертёж, то их изображают крестиками (рис. 91, *а*), а если из-за чертежа к нам — то точками (рис. 91, *б*). Как и в случае с током, каждый крестик — это как бы видимое нами хвостовое оперение летящей от нас стре-

а) × × × × × × × × ×

б) • • • • • • • • •

Рис. 91. Линии магнитного поля, направленные перпендикулярно плоскости чертежа: *а* — от наблюдателя; *б* — к наблюдателю

лы, а точка — остриё стрелы, летящей к нам (на обоих рисунках направление стрел совпадает с направлением магнитных линий).



Вопросы

1. Что является источником магнитного поля? **2.** Чем создаётся магнитное поле постоянного магнита? **3.** Что такое магнитные линии? Что принимают за их направление в какой-либо её точке? **4.** Как располагаются магнитные стрелки в магнитном поле, линии которого прямолинейны; криволинейны? **5.** О чём можно судить по картине линий магнитного поля? **6.** Какое магнитное поле — однородное или неоднородное — образуется вокруг полосового магнита; вокруг прямолинейного проводника с током; внутри соленоида, длина которого значительно больше его диаметра? **7.** Что можно сказать о модуле и направлении силы, действующей на магнитную стрелку в разных точках неоднородного магнитного поля; однородного магнитного поля? **8.** Чем отличается расположение магнитных линий в неоднородном и однородном магнитных полях?



УПРАЖНЕНИЕ 31

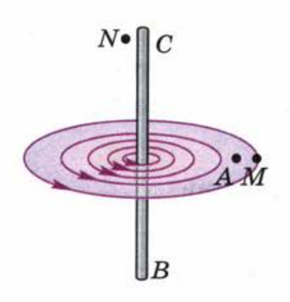


Рис. 92

1. На рисунке 92 изображён участок BC проводника с током. Вокруг него в одной из плоскостей показаны линии магнитного поля, созданного этим током. Существует ли магнитное поле в точке A?

2. В какой из точек — A, M или N (см. рис. 92) — магнитное поле тока, протекающего по участку BC проводника, будет действовать на магнитную стрелку с наибольшей силой; с наименьшей силой?

3. На рисунке 93 изображён проволочный виток с током и линии магнитного поля, создаваемого этим током.

   а) Есть ли среди указанных на рисунке точек A, B, C и D такие, в которых поле действовало бы на магнитную стрелку с одинаковой по модулю силой? ($AC = AD$, $AE = BE$.) Если такие точки есть, укажите их.

   б) В какой из точек — A, B, C или D — поле действует на магнитную стрелку с наибольшей силой?

   в) Можно ли найти такие точки, в которых сила действия поля на магнитную стрелку была бы одинакова как по модулю, так и по направлению? Если да, то сделайте в тетради рисунок и укажите на нём хотя бы две пары таких точек.

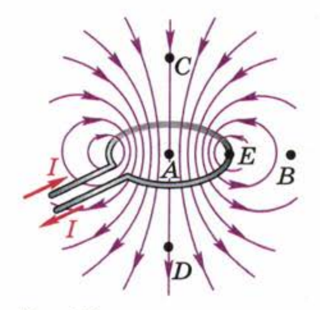


Рис. 93

§ 35 НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА И НАПРАВЛЕНИЕ ЛИНИЙ ЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

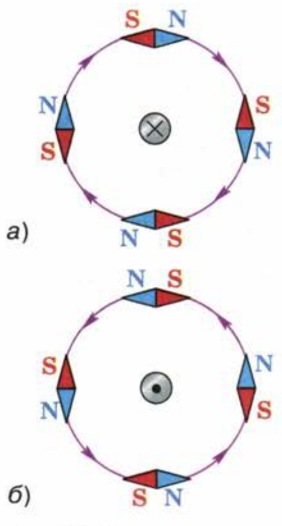


Рис. 94. Направление линий магнитного поля, созданного проводником с током, зависит от направления тока в проводнике

На рисунке 94 показано расположение магнитных стрелок вокруг проводника с током, расположенного перпендикулярно плоскости чертежа. Из рисунка видно, что изменение направления тока приводит к повороту всех магнитных стрелок на 180°. Причём в обоих случаях оси стрелок располагаются по касательным к магнитным линиям.

Следовательно, направление линий магнитного поля тока зависит от направления тока в проводнике.

Эта связь может быть выражена ***правилом буравчика*** (или *правилом правого винта*), которое заключается в следующем: **если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением линий магнитного поля тока** (рис. 95, 96).

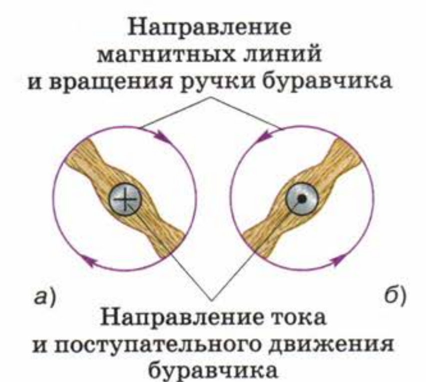


Рис. 95. Применение правила буравчика: проводник с током расположен перпендикулярно плоскости чертежа

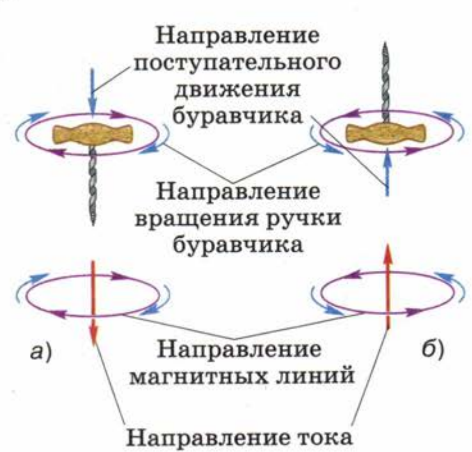


Рис. 96. Применение правила буравчика: проводник с током расположен в плоскости чертежа

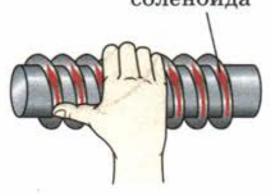


Рис. 97. Определение направления линий магнитного поля внутри соленоида

С помощью правила буравчика по направлению тока можно определить направление линий магнитного поля, создаваемого этим током, а по направлению линий магнитного поля — направление тока, создающего это поле.

Для определения направления линий магнитного поля соленоида удобнее пользоваться другим правилом, которое иногда называют ***правилом правой руки***. Это правило формулируется так: **если обхватить соленоид ладонью правой руки, направив четыре пальца по направлению тока в витках, то отставленный большой палец покажет направление линий магнитного поля внутри соленоида** (рис. 97).

Вы уже знаете, что магнитное поле соленоида (см. рис. 90) подобно полю постоянного полосового магнита (см. рис. 88). Соленоид, как и магнит, имеет полюсы: тот конец соленоида, из которого магнитные линии выходят, является северным полюсом, а тот, в который входят, — южным.

Зная направление тока в соленоиде, по правилу правой руки можно определить направление магнитных линий поля внутри него, а значит, и его магнитные полюсы.

И наоборот, по направлению магнитных линий поля внутри соленоида или расположению его полюсов можно определить направление тока в витках соленоида.

Правило правой руки можно применять и для определения направления линий магнитного поля в центре витка с током.



1. Опишите опыт, подтверждающий связь между направлением тока в проводнике и направлением линий магнитного поля, созданного проводником. **2.** Сформулируйте правило буравчика. **3.** Что можно определить, используя правило буравчика? **4.** Сформулируйте правило правой руки. **5.** Что можно определить с помощью правила правой руки?



Рис. 98

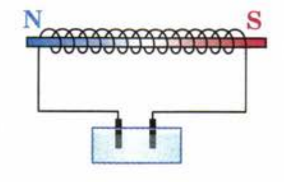


Рис. 99

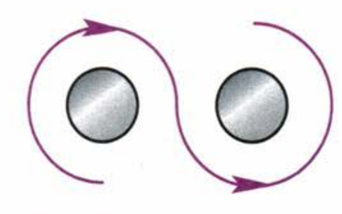


Рис. 100



УПРАЖНЕНИЕ 32

1. На рисунке 98 изображён проволочный прямоугольник, направление тока в нём показано стрелками. Перечертите рисунок в тетрадь и, пользуясь правилом буравчика, начертите вокруг каждой из его четырёх сторон по одной магнитной линии, указав стрелкой её направление.

2. Определите направление тока в катушке и полюсы источника тока (рис. 99), если при прохождении тока в катушке возникают указанные на рисунке магнитные полюсы.

3. Направление тока в витках обмотки подковообразного электромагнита показано стрелками (рис. 100). Определите полюсы электромагнита.

4*. Параллельные провода, по которым текут токи одного направления, притягиваются, а параллельные пучки электронов, движущихся в одном направлении, отталкиваются. В каком из этих случаев взаимодействие обусловлено электрическими силами, а в каком — магнитными? Почему вы так считаете?

§ 36 ОБНАРУЖЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ЕГО ДЕЙСТВИЮ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ПРАВИЛО ЛЕВОЙ РУКИ

Из курса физики 8 класса вы знаете, что *на всякий проводник с током, помещённый в магнитное поле и не совпадающий с его магнитными линиями, это поле действует с некоторой силой*.

Наличие такой силы можно показать с помощью установки, изображённой на рисунке 101. Трёхсторонняя рамка $ABCD$, изготовленная из медной проволоки, подвешена на крюках так, что может свободно отклоняться от вертикали. Сторона BC находится в облас-

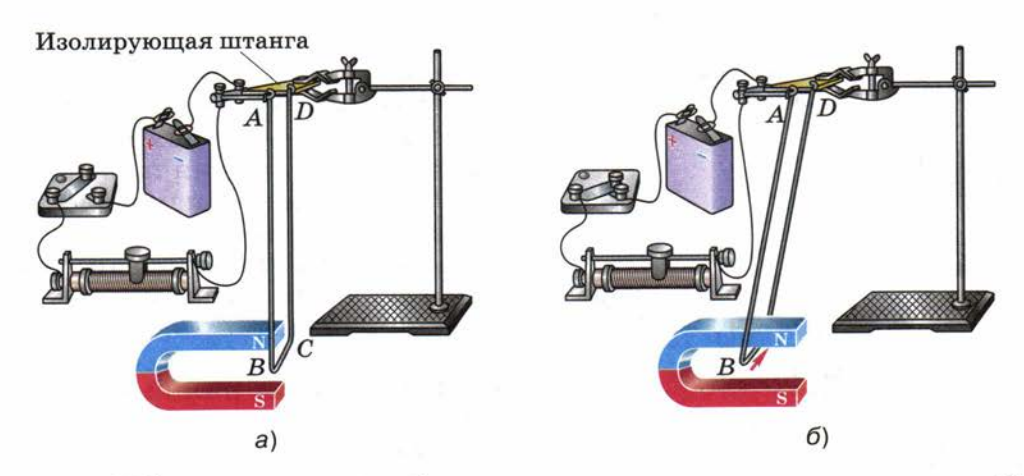


Рис. 101. Действие магнитного поля на проводник с током

ти наиболее сильного магнитного поля дугообразного магнита, располагаясь между его полюсами (рис. 101, *а*). Рамка присоединена к источнику тока последовательно с реостатом и ключом.

При замыкании ключа в цепи возникает электрический ток, и сторона *BC* втягивается в пространство между полюсами (рис. 101, *б*).

Если убрать магнит, то при замыкании цепи проводник *BC* двигаться не будет. Значит, со стороны магнитного поля на проводник с током действует некоторая сила, отклоняющая его от первоначального положения.

Действие магнитного поля на проводник с током может быть использовано для обнаружения магнитного поля в данной области пространства.

Конечно, обнаружить магнитное поле проще с помощью компаса. Но действие магнитного поля на находящуюся в нём магнитную стрелку компаса, по существу, тоже сводится к действию поля на элементарные электрические токи, циркулирующие в молекулах и атомах магнитного вещества, из которого изготовлена стрелка.

Таким образом, **магнитное поле создаётся электрическим током и обнаруживается по его действию на электрический ток.**

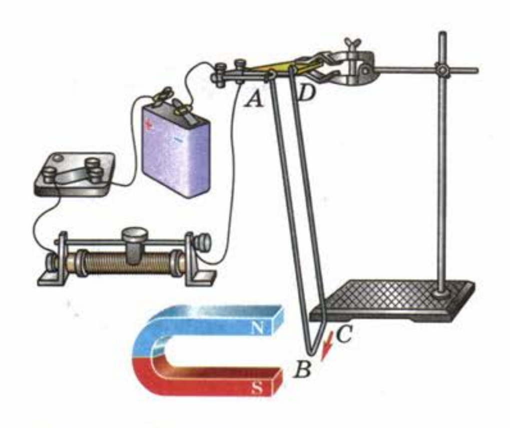


Рис. 102. Направление силы, действующей в магнитном поле на проводник с током, зависит от направления тока

Изменим направление тока в цепи, поменяв местами провода в гнёздах изолирующей штанги (рис. 102). При этом изменится и направление движения проводника *BC*, а значит, и направление действующей на него силы.

Направление силы изменится и в том случае, если, не меняя направления тока, поменять местами полюсы магнита (т. е. изменить направление линий магнитного поля).

Следовательно, *направление тока в проводнике, направление линий магнитного поля и направление силы, действующей на проводник, связаны между собой.*

Направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, можно определить, пользуясь ***правилом левой руки***.

В наиболее простом случае, когда проводник расположен в плоскости, перпендикулярной линиям магнитного поля, это правило заключается в следующем: **если левую руку расположить так, чтобы линии магнитного поля входили в ладонь перпендикулярно к ней, а четыре пальца были направлены по току, то отставленный на 90° большой палец покажет направление действующей на проводник силы** (рис. 103).

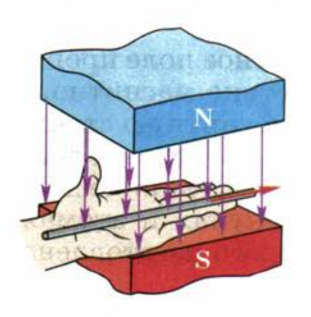


Рис. 103. Применение правила левой руки к проводнику с током

Пользуясь правилом левой руки, следует помнить, что за направление тока в электрической цепи принимается направление от положительного полюса источника тока к отрицательному. Другими словами, четыре пальца левой руки должны быть направлены против движения электронов в электрической цепи. В таких проводящих средах, как растворы электролитов, где электрический ток создаётся движением зарядов обоих знаков, направление тока, а значит, и направление четырёх пальцев левой руки совпадает с направлением движения положительно заряженных частиц.

С помощью правила левой руки можно определить направление силы, с которой магнитное поле действует на отдельно взятые движущиеся в нём частицы, как положительно, так и отрицательно заряженные.

Для наиболее простого случая, когда частица движется в плоскости, перпендикулярной магнитным линиям, это правило формулируется следующим образом: **если левую руку расположить так, чтобы линии магнитного поля входили в ладонь перпендикулярно к ней, а четыре пальца были направлены по движению положительно заряженной частицы (или против движения отрицательно заряженной), то отставленный на 90° большой палец покажет направление действующей на частицу силы** (рис. 104).

По правилу левой руки можно также определить направление тока (если знаем, как направлены линии магнитного поля и действующая на проводник сила), направление магнитных линий (если известны направления тока и силы), знак заряда движущейся частицы (по направлению магнитных линий, силы и скорости движения частицы) и т. д.

Следует отметить, что сила действия магнитного поля на проводник с током или движу-

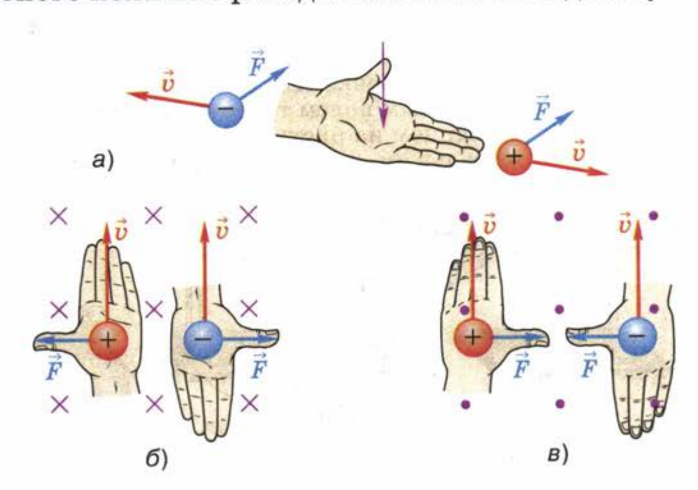
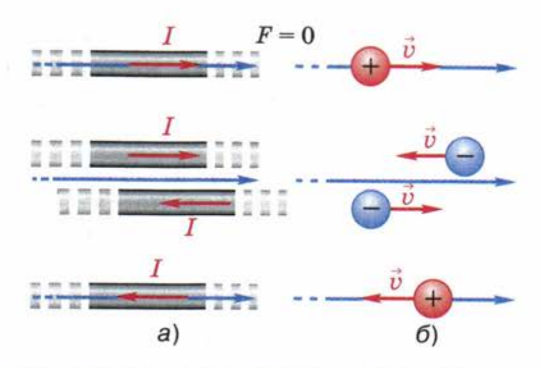


Рис. 104. Применение правила левой руки к заряженным частицам, движущимся в магнитном поле

Рис. 105. Магнитное поле не действует в случаях, если прямолинейный проводник с током или скорость движущейся заряженной частицы параллельны линиям магнитного поля или совпадают с ними



щуюся заряженную частицу равна нулю, если направление тока в проводнике или скорость частицы совпадают с линией магнитной индукции или параллельны ей (рис. 105).



1. Какой опыт позволяет обнаружить наличие силы, действующей на проводник с током в магнитном поле? **2.** Как обнаруживается магнитное поле? **3.** От чего зависит направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле? **4.** Сформулируйте правило левой руки для находящегося в магнитном поле проводника с током; для движущейся в этом поле заряженной частицы. **5.** Что можно определить, пользуясь правилом левой руки? **6.** В каком случае сила действия магнитного поля на проводник с током или движущуюся заряженную частицу равна нулю?



УПРАЖНЕНИЕ 33

1. В какую сторону покатится лёгкая алюминиевая трубочка при замыкании цепи (рис. 106)?

2. На рисунке 107 изображены два оголённых проводника, соединённых с источником тока, и лёгкая алюминиевая трубочка AB.

   Вся установка находится в магнитном поле. Определите направление тока в трубочке AB, если в результате взаимодействия этого тока с магнитным полем трубочка катится по проводникам в направлении, указанном на рисунке. Какой полюс источника тока является положительным, а какой — отрицательным?

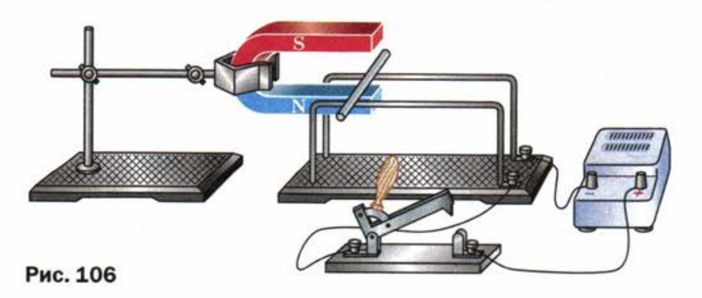


Рис. 106

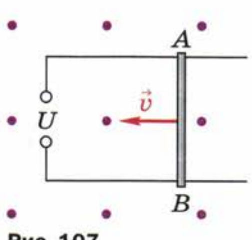


Рис. 107

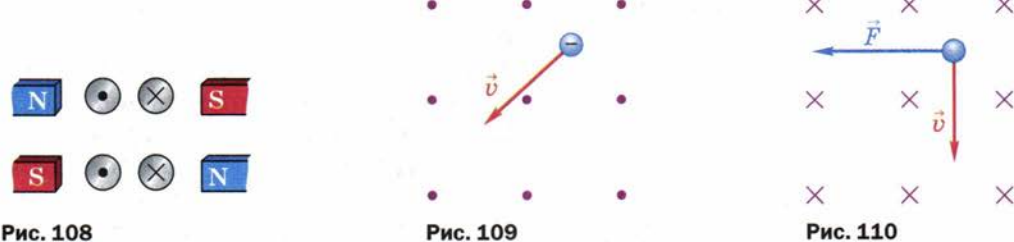


Рис. 108 **Рис. 109** **Рис. 110**

3. Между полюсами магнитов (рис. 108) расположены четыре проводника с током. Определите, в какую сторону движется каждый из них.

4. Отрицательно заряженная частица движется со скоростью $\vec{v}$ в магнитном поле (рис. 109). Укажите направление силы, с которой поле действует на частицу.

5. Магнитное поле действует с силой $\vec{F}$ на частицу, движущуюся со скоростью $\vec{v}$ (рис. 110). Определите знак заряда частицы.

§ 37 ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

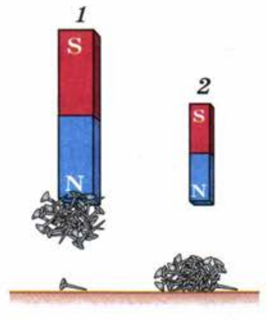


Рис. 111. Магнитное поле первого магнита сильнее, чем второго

Многие из вас наверняка замечали, что одни магниты создают в пространстве более сильные поля, чем другие. Например, поле первого магнита, изображённого на рисунке 111, сильнее, чем второго. Действительно, при одном и том же расстоянии до гвоздей, рассыпанных на столе, сила притяжения к первому магниту оказалась достаточной для преодоления силы тяжести гвоздей, а сила притяжения ко второму — нет.

Какой же величиной можно охарактеризовать магнитное поле?

Магнитное поле характеризуется векторной физической величиной, которая обозначается символом $\vec{B}$ и называется индукцией магнитного поля (или магнитной индукцией).

Поясним, что это за величина.

Напомним, что магнитное поле может действовать с определённой силой на помещённый в него проводник с током.

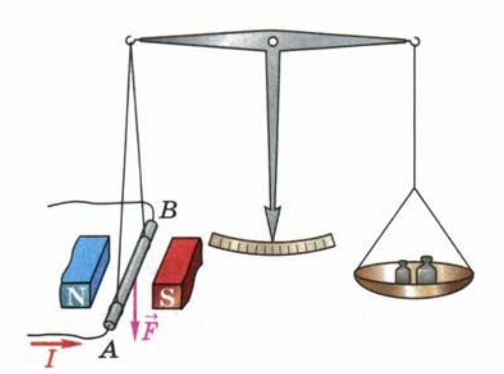
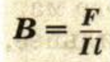


Рис. 112. Опыт по измерению силы, действующей на помещённый в магнитное поле проводник с током

Поместим прямолинейный участок проводника AB с током в магнитное поле перпендикулярно его магнитным линиям (рис. 112). При показанном на рисунке направлении силы тока I в проводнике и расположении полюсов магнита действующая на проводник сила $\vec{F}$, согласно правилу левой руки, будет направлена вниз. Определить эту силу можно, вычислив вес гирьки, которую приходится добавлять на правую чашу весов для уравновешивания силы $\vec{F}$.

Опыты показывают, что модуль этой силы зависит от самого́ магнитного поля — более мощный магнит действует на данный проводник с большей силой. Кроме того, сила действия магнитного поля на проводник пропорциональна длине l этого проводника и силе тока I в нём.



Отношение же модуля силы F к длине проводника l и силе тока I $\left(\text{т. е. } \frac{F}{Il}\right)$ есть *величина постоянная*. Она не зависит ни от длины проводника, ни от силы тока в нём. Отношение $\frac{F}{Il}$ зависит только от поля и может служить его количественной характеристикой.

Эта величина и принимается за модуль вектора магнитной индукции:

$$\boldsymbol{B} = \frac{\boldsymbol{F}}{\boldsymbol{Il}}.$$

Модуль вектора магнитной индукции *B* равен отношению модуля силы *F*, с которой магнитное поле действует на расположенный перпендикулярно магнитным линиям проводник с током, к силе тока *I* в проводнике и его длине *l*.

По этой формуле можно определить индукцию *однородного* магнитного поля.

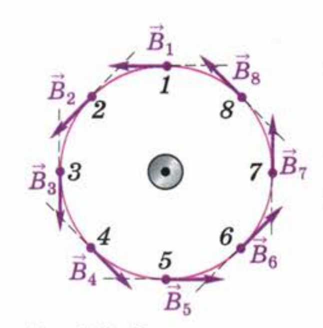


Рис. 113. Вектор магнитной индукции прямого проводника с током направлен по касательной в каждой точке поля

В СИ единица магнитной индукции называется *тесла* (**Тл**) в честь югославского электротехника ***Николы Тесла.***

Установим взаимосвязь между единицей магнитной индукции и единицами других величин СИ:

$$1\ \text{Тл} = 1\ \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

До сих пор для графического изображения магнитных полей мы пользовались линиями, которые условно называли магнитными линиями или линиями магнитного поля. Более точное название магнитных линий — ***линии магнитной индукции*** (или ***линии индукции магнитного поля***).

Линиями магнитной индукции называются линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора магнитной индукции.

Данное определение линий магнитной индукции можно пояснить с помощью рисунка 113. На нём изображён проводник с током, расположенный перпендикулярно плоскости чертежа. Окружность вокруг проводника представляет собой одну из линий индукции магнитного поля, созданного протекающим по проводнику током. Проведённые к этой окружности касательные в любой точке совпадают с вектором магнитной индукции.

Теперь, пользуясь термином «магнитная индукция», назовём основные признаки однородного и неоднородного магнитных полей.

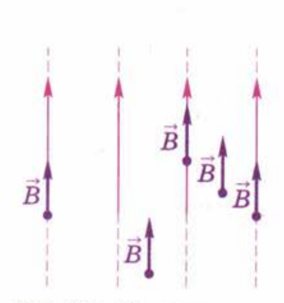
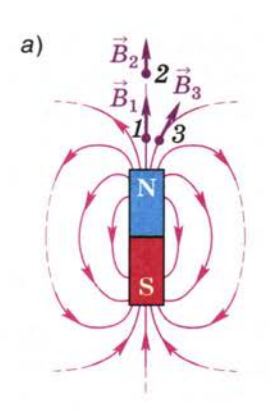


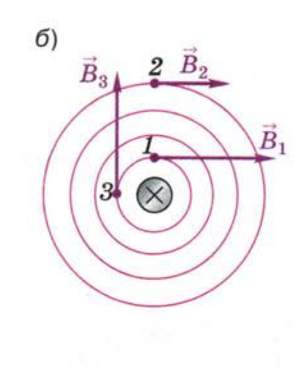
Рис. 114. Во всех точках однородного магнитного поля вектор магнитной индукции $\vec{B}$ одинаков по модулю и по направлению

В однородном магнитном поле (рис. 114) вектор магнитной индукции $\vec{B}$ во всех произвольно выбранных точках поля одинаков как по модулю, так и по направлению.

Сравним это поле с двумя неоднородными полями: полем постоянного полосового магни-

Рис. 115. В разных точках неоднородного магнитного поля вектор магнитной индукции может быть различным как по модулю, так и по направлению



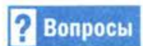


та (рис. 115, *а*) и полем тока, протекающего по прямолинейному участку проводника (рис. 115, *б*).

Легко заметить, что в неоднородных полях, в отличие от однородного, вектор магнитной индукции меняется от точки к точке. Например, в каждом из рассматриваемых неоднородных полей при переходе из точки *1* в точку *2* вектор магнитной индукции меняется по модулю, при переходе из точки *1* в точку *3* — по направлению, при переходе из точки *2* в точку *3* вектор магнитной индукции меняется как по модулю, так и по направлению.

Магнитное поле называется однородным, если во всех его точках магнитная индукция $\vec{B}$ одинакова. В противном случае поле называется ***неоднородным.***

Чем больше магнитная индукция в данной точке поля, тем с большей силой будет действовать поле в этой точке на магнитную стрелку или движущийся электрический заряд.



1. Как называется векторная величина, которая служит количественной характеристикой магнитного поля? **2.** По какой формуле определяется модуль вектора магнитной индукции однородного магнитного поля? **3.** Что называется линиями магнитной индукции? **4.** В каком случае магнитное поле называется однородным, а в каком — неоднородным? **5.** Как зависит сила, действующая в данной точке магнитного поля на магнитную стрелку или движущийся заряд, от магнитной индукции в этой точке?

УПРАЖНЕНИЕ 34

1. В однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции поместили прямолинейный проводник, по которому протекает ток. Сила тока в проводнике 4 А. Определите индукцию этого поля, если оно действует с силой 0,2 Н на каждые 10 см длины проводника.
2. Проводник с током поместили в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции B. Через некоторое время силу тока в проводнике уменьшили в 2 раза. Изменилась ли при этом индукция B магнитного поля, в которое был помещён проводник? Сопровождалось ли уменьшение силы тока изменением какой-либо другой физической величины? Если да, то что это за величина и как она изменилась?

§ 38 МАГНИТНЫЙ ПОТОК

На рисунке 116, *а* изображён проволочный контур, помещённый в однородное магнитное поле. Принято говорить, что контур в магнитном поле пронизывается определённым ***магнитным потоком Ф***, или ***потоком вектора магнитной индукции***.

Опыты показывают, что магнитный поток сквозь контур пропорционален модулю вектора индукции однородного магнитного поля и площади, ограниченной этим контуром. Кроме того, магнитный поток зависит от того, как расположена плоскость контура по отношению к линиям магнитной индукции.

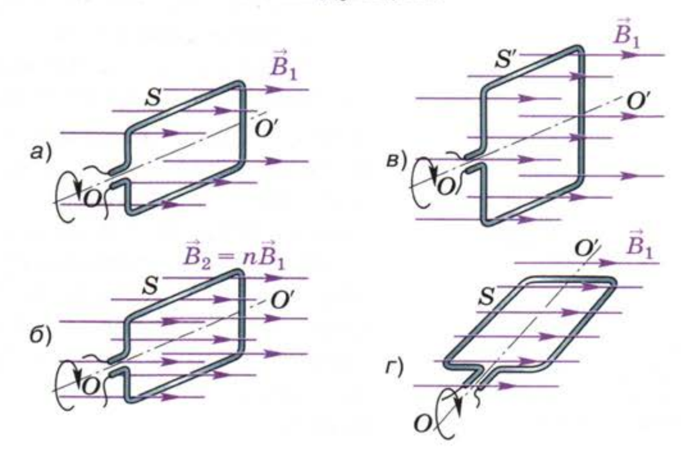


Рис. 116. Зависимость магнитного потока, пронизывающего площадь контура, от модуля вектора магнитной индукции, площади контура и от ориентации плоскости контура по отношению к линиям магнитной индукции

6 – Перышкин, 9 кл.

Допустим, что индукция магнитного поля, пронизывающего ограниченную контуром площадь, стала больше. Это могло произойти, например, в результате увеличения силы тока, создающего это магнитное поле, или при перемещении контура в другое, более сильное поле.

Поскольку магнитный поток пропорционален индукции магнитного поля, то при её увеличении в n раз (от значения B_1 до значения $B_2 = nB_1$, как показано на рис. 116, *а, б*) во столько же раз возрастёт и поток $Ф$, пронизывающий площадь S данного контура.

При том же самом магнитном поле с индукцией B_1 магнитный поток, пронизывающий бóльшую площадь S' (рис. 116, *в*), будет во столько же раз больше потока через площадь S (см. рис. 116, *а*), во сколько раз S' больше, чем S.

Если плоскость контура перпендикулярна линиям магнитной индукции (см. рис. 116, *а*), то при данной индукции B_1 поток $Ф$, пронизывающий ограниченную этим контуром площадь S, максимален.

При вращении контура вокруг оси OO' проходящий сквозь него магнитный поток уменьшается (по закону косинуса) и становится равным нулю, когда плоскость контура располагается параллельно линиям магнитной индукции (рис. 116, *г*). В этом случае линии магнитной индукции как бы скользят по плоскости рамки, не пронизывая её.

Таким образом, **магнитный поток, пронизывающий площадь контура, меняется при изменении модуля вектора магнитной индукции $\vec{B}$, площади контура S и при вращении контура, т. е. при изменении его ориентации по отношению к линиям индукции магнитного поля.**

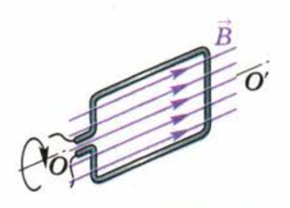


Рис. 117. Магнитный поток равен нулю, если линии магнитной индукции лежат в плоскости контура

Если же контур вращается так, что при любом его положении линии магнитной индукции лежат в плоскости контура, не пересекая ограниченную им площадь (рис. 117), то поток не меняется: в любой момент времени он равен нулю.



1. От чего зависит магнитный поток, пронизывающий площадь плоского контура, помещённого в однородное магнитное поле? 2. Как меняется магнитный поток при увеличении в n раз магнитной индукции, если ни площадь, ни ориентация контура не меняются? 3. При какой ориентации контура по отношению к линиям магнитной индукции магнитный поток, пронизывающий площадь этого контура, максимален; равен нулю? 4. Меняется ли магнитный поток при таком вращении контура, когда линии магнитной индукции то пронизывают его, то скользят по его плоскости?



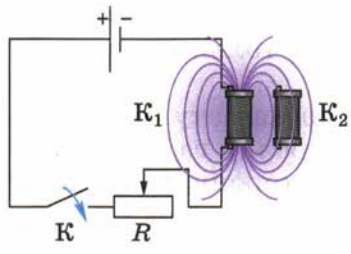


Рис. 118

Проволочная катушка $К_1$ со стальным сердечником включена в цепь источника постоянного тока последовательно с реостатом R и ключом К (рис. 118). Электрический ток, протекающий по виткам катушки $К_1$, создаёт в пространстве вокруг неё магнитное поле. В поле катушки $К_1$ находится такая же катушка $К_2$.

Каким образом можно менять магнитный поток, пронизывающий катушку $К_2$? Рассмотрите все возможные варианты.

§ 39 ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ



МАЙКЛ ФАРАДЕЙ

(1791—1867)

Английский физик. Открыл явление электромагнитной индукции, экстратоки при замыкании и размыкании

Вы уже знаете, что вокруг электрического тока всегда существует магнитное поле. Электрический ток и магнитное поле неотделимы друг от друга.

Но если электрический ток, как говорят, «создаёт» магнитное поле, то не существует ли обратного явления? Нельзя ли с помощью магнитного поля «создать» электрический ток?

Такую задачу в начале XIX в. пытались решить многие учёные. Поставил её перед собой и английский учёный ***Майкл Фарадей***. «Превратить магнетизм в электричество» — так записал в своём дневнике эту задачу Фарадей в 1822 г. Почти 10 лет упорной работы потребовалось учёному для её решения.

Чтобы понять, как Фарадею удалось «превратить магнетизм в элект-

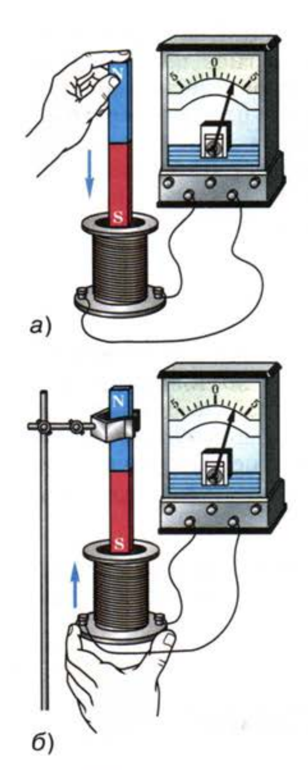


Рис. 119. Возникновение индукционного тока при движении магнита и катушки относительно друг друга

ричество», выполним некоторые опыты Фарадея, используя современные приборы.

На рисунке 119, *а* показано, что если в катушку, замкнутую на гальванометр, вдвигается магнит, то стрелка гальванометра при этом отклоняется, указывая на появление *индукционного* (наведённого) *тока* в цепи катушки. Индукционный ток в проводнике представляет собой такое же упорядоченное движение электронов, как и ток, полученный от гальванического элемента или аккумулятора. Название «индукционный» указывает только на причину его возникновения.

При извлечении магнита из катушки снова наблюдается отклонение стрелки гальванометра, но в противоположную сторону, что указывает на возникновение в катушке тока противоположного направления.

Как только движение магнита относительно катушки прекращается, прекращается и ток. Следовательно, ток в цепи катушки существует только во время движения магнита относительно катушки.

Опыт можно изменить. На неподвижный магнит будем надевать катушку и снимать её (рис. 119, *б*). И опять можно обнаружить, что во время движения катушки относительно магнита в цепи снова появляется ток.

На рисунке 120 изображена катушка *A*, включённая в цепь источника тока. Эта катушка вставлена в другую катушку *C*, подключённую к гальванометру. При замыкании и раз-

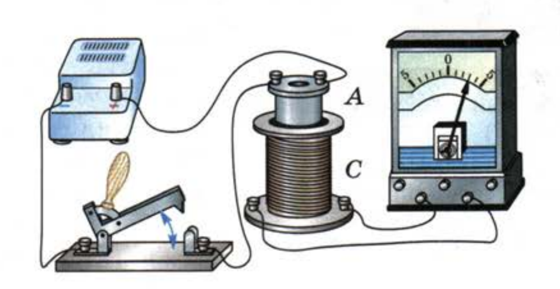


Рис. 120. Возникновение индукционного тока при замыкании и размыкании электрической цепи

мыкании цепи катушки A в катушке C возникает индукционный ток.

Можно вызвать появление индукционного тока в катушке C и путём изменения силы тока в катушке A или движением этих катушек относительно друг друга.

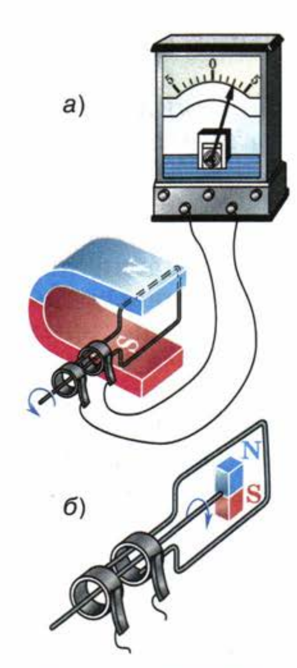


Рис. 121. При вращении контура в магнитном поле (магнита относительно контура) изменение магнитного потока приводит к возникновению индукционного тока

Проделаем ещё один опыт. Поместим в магнитное поле плоский контур из проводника, концы которого соединим с гальванометром (рис. 121, *а*). При повороте контура гальванометр отмечает появление в нём индукционного тока. Ток будет появляться и в том случае, если рядом с контуром или внутри него вращать магнит (рис. 121, *б*).

Во всех рассмотренных опытах индукционный ток возникал при изменении магнитного потока, пронизывающего охваченную проводником площадь.

В случаях, изображённых на рисунках 119 и 120, магнитный поток менялся за счёт изменения индукции магнитного поля. Действительно, при движении магнита и катушки относительно друг друга (см. рис. 119) катушка попадала в области поля с большей или меньшей магнитной индукцией (так как поле магнита неоднородное). При замыкании и размыкании цепи катушки A (см. рис. 120) индукция создаваемого этой катушкой магнитного поля менялась за счёт изменения силы тока в ней.

При вращении проволочного контура в магнитном поле (см. рис. 121, *а*) или магнита относительно контура (см. рис. 121, *б*) магнитный поток менялся за счёт изменения ориентации этого контура по отношению к линиям магнитной индукции.

Таким образом,

при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего площадь, ограниченную замкнутым проводником, в этом проводнике возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока.

В этом и заключается явление ***электромагнитной индукции***.

Открытие электромагнитной индукции принадлежит к числу самых замечательных научных достижений первой половины XIX в. Оно вызвало появление и бурное развитие электротехники и радиотехники.

На основании явления электромагнитной индукции были созданы мощные генераторы электрической энергии, в разработке которых принимали участие учёные и техники разных стран. Среди них были и наши соотечественники: ***Эмилий Христианович Ленц, Борис Семёнович Якоби, Михаил Иосифович Доливо-Добровольский*** и другие, внёсшие большой вклад в развитие электротехники.



1. С какой целью ставились опыты, изображённые на рисунках 119—121? Как они проводились? **2.** При каком условии в опытах (см. рис. 119, 120) в катушке, замкнутой на гальванометр, возникал индукционный ток? **3.** В чём заключается явление электромагнитной индукции? **4.** В чём важность открытия явления электромагнитной индукции?



УПРАЖНЕНИЕ 36

1. Как создать кратковременный индукционный ток в катушке K_2, изображённой на рисунке 118?

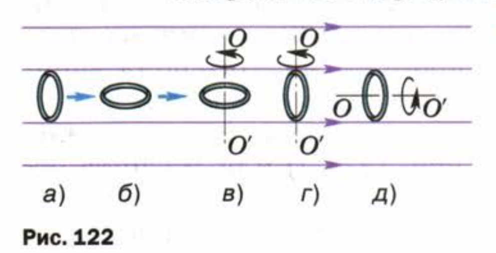


Рис. 122

2. Проволочное кольцо помещено в однородное магнитное поле (рис. 122). Стрелочки, изображённые рядом с кольцом, показывают, что в случаях *а* и *б* кольцо движется прямолинейно вдоль линий индукции магнитного поля, а в случаях *в*, *г* и *д* — вращается вокруг оси OO'. В каких из этих случаев в кольце может возникнуть индукционный ток?

§ 40 НАПРАВЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА. ПРАВИЛО ЛЕНЦА

В предыдущем параграфе были рассмотрены опыты по получению индукционного тока и установлена причина его возникновения.



Рис. 123. При приближении к сплошному кольцу любого полюса магнита кольцо отталкивается от него

Как же направлен индукционный ток? Для ответа на этот вопрос воспользуемся прибором, изображённым на рисунке 123. Он представляет собой узкую алюминиевую пластинку с алюминиевыми кольцами на концах. Одно кольцо сплошное, другое имеет разрез. Пластинка с кольцами помещена на стойку и может свободно вращаться вокруг вертикальной оси.

Возьмём полосовой магнит и внесём его в кольцо с разрезом — кольцо останется на месте. Если же вносить магнит в сплошное кольцо, то оно будет отталкиваться, уходить от магнита, поворачивая при этом всю пластинку. Результат будет точно таким же, если магнит будет повёрнут к кольцам не северным полюсом (как показано на рисунке), а южным. Объясним наблюдаемые явления.

При приближении к кольцу любого полюса магнита, поле которого является неоднородным, проходящий сквозь кольцо магнитный поток увеличивается (рис. 124). При этом в сплошном кольце возникает индукционный ток, а в кольце с разрезом тока не будет.

Ток в сплошном кольце создаёт в пространстве магнитное поле, благодаря чему *кольцо приобретает свойства магнита*. Взаимодействуя с приближающимся полосовым магнитом, кольцо отталкивается от него. Из этого следует, что кольцо и магнит обращены друг к другу одноимёнными полюсами, а векторы

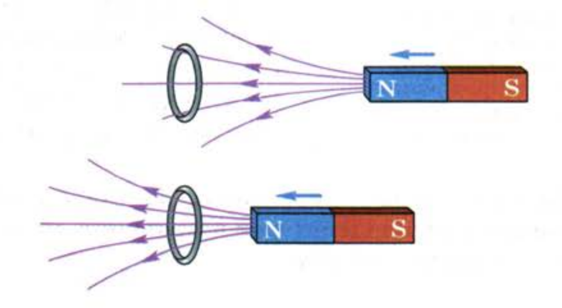
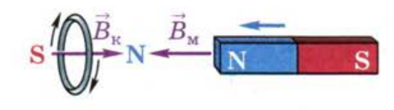


Рис. 124. Возникновение индукционного тока в сплошном кольце при приближении к кольцу магнита



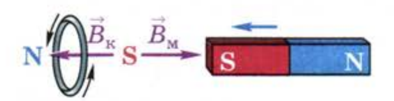
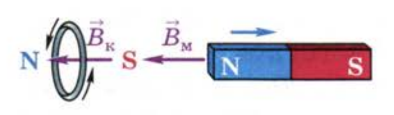


Рис. 125. Определение направления индукционного тока в кольце



Рис. 126. При удалении магнита от сплошного кольца оно, притягиваясь, следует за магнитом



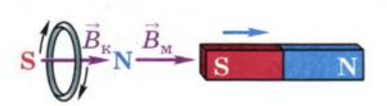


Рис. 127. Направление индукционного тока в кольце меняется при изменении направления движения магнита относительно кольца

магнитной индукции ($\vec{B}_к$ и $\vec{B}_м$) их полей направлены в противоположные стороны (рис. 125). Зная направление вектора индукции магнитного поля кольца, можно по правилу правой руки (см. рис. 97) определить направление индукционного тока в кольце. Отодвигаясь от приближающегося к нему магнита, кольцо противодействует увеличению проходящего сквозь него внешнего магнитного потока.

Теперь посмотрим, что произойдёт при уменьшении внешнего магнитного потока сквозь кольцо. Для этого, удерживая кольцо рукой, внесём в него магнит. Затем, отпустив кольцо, начнём удалять магнит. В этом случае кольцо будет следовать за магнитом, притягиваться к нему (рис. 126). Значит, кольцо и магнит обращены друг к другу разноимёнными полюсами, а векторы магнитной индукции их полей направлены в одну сторону (рис. 127). При *одинаковом* направлении $\vec{B}_к$ и $\vec{B}_м$ магнитное поле тока будет *противодействовать уменьшению* внешнего магнитного потока, проходящего сквозь кольцо.

Мы видим, что для определения направления индукционного тока прежде всего необходимо узнать, как направлен вектор магнитной индукции созданного этим током магнитного поля (в центре кольца). На основании результатов рассмотренных опытов (в одном из них внешний магнитный поток увеличивался, а в другом — уменьшался) было сформулировано правило, которое в современной формулировке звучит так:

возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует изменению внешнего магнитного потока, которое вызвало этот ток.

Данное правило было установлено в 1834 г. российским учёным ***Эмилием Христиановичем Ленцем***, в связи с чем называется ***правилом Ленца***.

? Вопросы

1. Для чего проводился опыт, изображённый на рисунках 123 и 126? **2.** Почему кольцо с разрезом не реагирует на приближение магнита? **3.** Объясните явления, происходящие при приближении магнита к сплошному кольцу (см. рис. 125); при удалении магнита (см. рис. 127). **4.** Как определить направление индукционного тока в кольце? **5.** Сформулируйте правило Ленца.

УПРАЖНЕНИЕ 37

1. Как вы думаете, почему прибор, изображённый на рисунке 123, изготовлен из алюминия? Как проходил бы опыт, если бы прибор был железным; медным?

2. В данном ниже перечне логических операций, которые мы выполняли для определения направления индукционного тока, *нарушена последовательность их проведения*. Запишите в тетради буквы, обозначающие эти операции, расположив их в правильной последовательности.

а) Определили направление индукционного тока в кольце (пользуясь правилом правой руки).

б) Определили направление вектора индукции $\vec{B}_к$ магнитного поля тока в кольце по отношению к направлению вектора магнитной индукции $\vec{B}_м$ поля магнита, исходя из того, что кольцо отталкивается от магнита при его приближении (значит, они обращены друг к другу одноимёнными полюсами, и $\vec{B}_к \uparrow\downarrow \vec{B}_м$) и притягивается при удалении (значит, кольцо и магнит обращены друг к другу разноимёнными полюсами, и $\vec{B}_к \uparrow\uparrow \vec{B}_м$).

в) Определили направление вектора магнитной индукции $\vec{B}_м$ поля магнита (по расположению его полюсов).

§ 41 ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ

Рассмотрим частный случай электромагнитной индукции: возникновение индукционного тока в катушке при изменении силы тока в ней.

Для этого проведём опыт, изображённый на рисунке 128, *а* и схеме 128, *б*. При выполнении первой части опыта неоновая лампа $Л_н$ нам не понадобится, поэтому вынем её из патрона, ос-

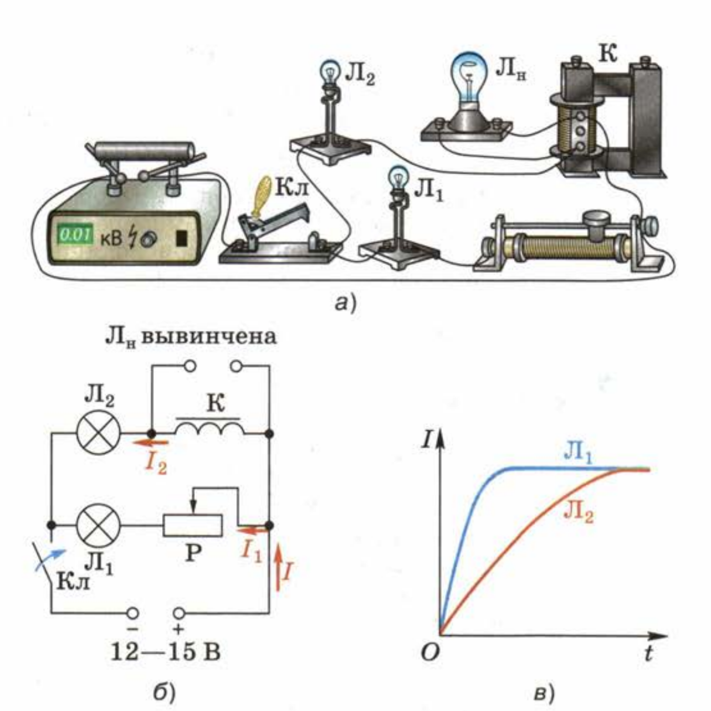


Рис. 128. Возникновение индукционного тока в катушке при изменении силы тока в ней при замыкании цепи

тавив только две параллельные ветви: с реостатом Р и катушкой К. (Обратите внимание на условное обозначение катушки с сердечником на схеме 128, *б* и запомните его.)

Замкнём цепь ключом Кл. Лампа $Л_1$ загорится сразу, а $Л_2$ — с опозданием приблизительно в 1 с. Причина запаздывания заключается в следующем. При замыкании цепи силы токов I, I_1 и I_2 (см. рис. 128, *б*) начинают расти. Благодаря этому увеличиваются индукции B_1 и B_2 магнитных полей (создаваемых этими же токами I_1 и I_2) и магнитные потоки $Ф_1$ и $Ф_2$, пронизывающие соответственно витки реостата и катушки. Получается, что проходящие сквозь реостат и катушку переменные потоки $Ф_1$ и $Ф_2$ создаются не внешними причинами (как было в опытах, рассмотренных в § 39), а благодаря изменению токов в самих этих устройствах.

Согласно явлению электромагнитной индукции, в реостате и в катушке возникают индукционные токи. Они препятствуют увеличению силы тока I_1 и I_2 (это следует из правила Ленца и правила правой руки). Но в катушке К индукционный ток будет значительно больше, чем в реостате Р, так как катушка имеет гораздо большее число витков и сердечник, т. е. обладает большей *индуктивностью*, чем реостат.

Индуктивность (коэффициент самоиндукции) — это физическая величина, введённая для оценивания способности катушки противодействовать изменению силы тока в ней. Индуктивность L катушки зависит от её формы, размеров, числа витков и наличия или отсутствия сердечника (например, железного). Единица индуктивности в СИ — *генри* (**Гн**).

Чем больше сила индукционного тока, тем большее противодействие он оказывает изменению силы тока, созданного источником. Поэтому ток в ветви с катушкой возрастает медленнее, чем в ветви с реостатом, и лампа $Л_2$ загорается с опозданием (рис. 128, *в*).

Теперь посмотрим, что будет происходить при размыкании цепи. Для этого неоновую лампу $Л_н$ поместим в патрон, а лампу $Л_1$ вывинтим, разомкнув тем самым участок цепи с реостатом (рис. 129).

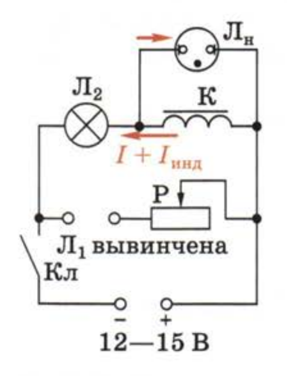


Рис. 129. Демонстрация явления самоиндукции при размыкании цепи

При замыкании цепи загорится только лампа $Л_2$. Неоновая лампа не включается потому, что напряжение, необходимое для её зажигания, значительно больше напряжения, подаваемого от источника тока.

Теперь разомкнём цепь — лампа накаливания гаснет, зато неоновая даёт яркую кратковременную вспышку. Значит, уменьшение тока при размыкании цепи создаёт настолько мощный индукционный ток, противодействующий уменьшению тока в катушке, что напряжение на ней оказывается достаточным

для зажигания лампы (и значительно превышающим напряжение источника!).

В проделанном опыте мы наблюдали явление самоиндукции.

Явление самоиндукции заключается в возникновении индукционного тока в катушке при изменении силы тока в ней. При этом возникающий индукционный ток называется током самоиндукции.

Конечно, ток самоиндукции возникает не только в катушках, но и в любых других проводниках, если сила тока изменяется. Но, как уже отмечалось, в катушках с относительно небольшим числом витков, не имеющих сердечника, и тем более в прямых проводниках (т. е. в элементах цепи, обладающих малой индуктивностью) ток самоиндукции обычно невелик и не оказывает существенного влияния на процессы в электрической цепи.

$$E_{маг} = \frac{Li^2}{2}$$

Появление мощного индукционного тока при размыкании цепи свидетельствует о том, что магнитное поле тока в катушке обладает энергией. Именно за счёт уменьшения энергии магнитного поля совершается работа по созданию индукционного тока. А накопилась эта энергия раньше, при замыкании цепи, когда за счёт энергии источника тока совершалась работа по преодолению тока самоиндукции, препятствующего увеличению тока в цепи, и его магнитного поля.

Энергия магнитного поля тока определяется по формуле

$$E_{маг} = \frac{Li^2}{2},$$

где L — индуктивность проводника, i — сила тока в этом проводнике.

? Вопросы

1. Какое явление изучалось на опыте, представленном на рисунках 128 и 129? 2. Расскажите о ходе каждой части опыта. Объясните наблюдаемые явления. 3. В чём заключается явление самоиндукции? 4. Может ли возникнуть ток самоиндукции в прямом проводнике

с током? Если нет, то объясните почему; если да, то при каком условии. **5.** За счёт уменьшения какой энергии совершалась работа по созданию индукционного тока при размыкании цепи?



УПРАЖНЕНИЕ 38

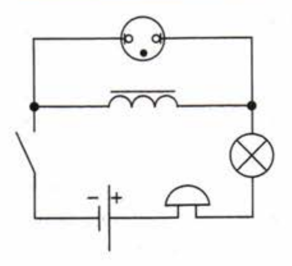


Рис. 130

В электрической цепи (рис. 130) напряжение, получаемое от источника тока, меньше напряжения зажигания неоновой лампы.

Как будет себя вести неоновая лампа при замыкании и размыкании ключа?

Что будет происходить с каждым элементом цепи (исключая источник тока и ключ) при замкнутом ключе; при замыкании ключа; при размыкании ключа?

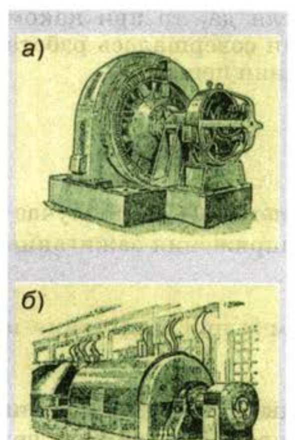
§ 42 ПОЛУЧЕНИЕ И ПЕРЕДАЧА ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ТРАНСФОРМАТОР

Рассмотрим ещё раз получение индукционного тока в катушке с помощью перемещения относительно неё постоянного магнита (см. рис. 119, *а*). Но теперь будем периодически двигать магнит вверх и вниз в течение нескольких секунд. Мы увидим, что при этом стрелка гальванометра отклоняется от нулевого деления то в одну, то в другую сторону. Это говорит о том, что модуль силы индукционного тока в катушке и направление этого тока периодически меняются.

Электрический ток, периодически меняющийся со временем по модулю и направлению, называется переменным током.

В осветительной сети наших домов и во многих отраслях промышленности используется именно переменный ток.

В настоящее время для получения переменного тока используют в основном ***электромеханические индукционные генераторы***,



Генератор переменного тока:
а — внешний вид;
б — общий вид на электростанции вместе с паровой турбиной, приводящей ротор генератора во вращение

т. е. устройства, в которых механическая энергия преобразуется в электрическую. Индукционными они называются потому, что их действие основано на явлении электромагнитной индукции.

В § 39 рассматривался пример получения индукционного тока в плоском контуре при вращении внутри него магнита (см. рис. 121, *б*). На этом принципе и работает электромеханический генератор переменного тока. Неподвижная часть генератора, аналогичная контуру, называется ***статором***, а вращающаяся, т. е. магнит, — ***ротором***. В мощных промышленных генераторах вместо постоянного магнита используется электромагнит.

Статор промышленного генератора представляет собой стальную станину цилиндрической формы (станина — это основная несущая часть машины, на которой монтируются различные рабочие узлы, механизмы и пр.). Во внутренней его части прорезаются пазы, в которые витками укладывается толстый медный провод. В витках и индуцируется переменный электрический ток при изменении пронизывающего их магнитного потока.

Магнитное поле создаётся ротором (рис. 131, *а*). Он представляет собой электромагнит: на стальной сердечник сложной формы надета обмотка, по которой протекает постоянный электрический ток. Ток к этой обмотке подводится через щётки и кольца от постороннего источника постоянного тока.

На рисунке 131, *б* приведена схема генератора переменного тока. Штрихами показано примерное расположение линий индукции магнитного поля ротора. При вращении ротора какой-либо внешней механической силой создаваемое им магнитное поле тоже вращается. При этом магнитный поток, пронизывающий витки обмотки статора, периодически меняется, в результате чего в них индуцируется переменный ток.

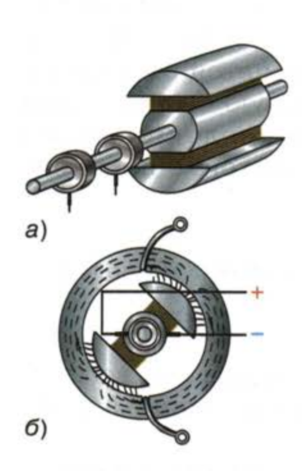
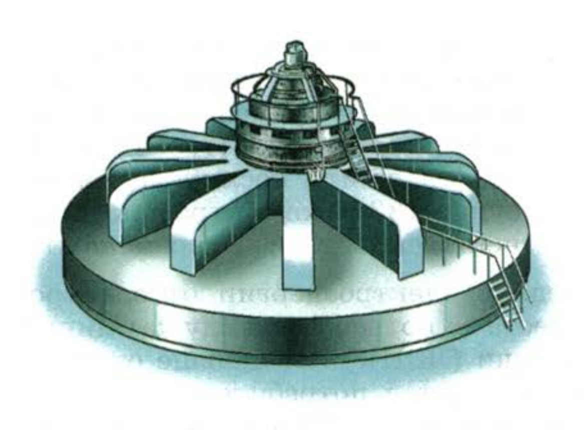
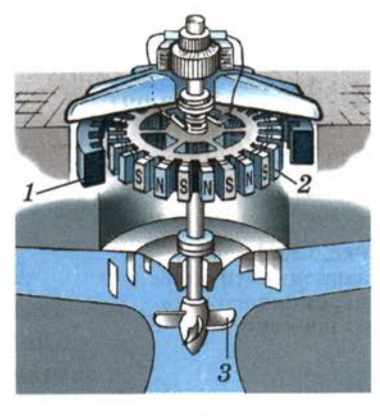


Рис. 131. Схема генератора переменного тока



а)



б)

Рис. 132. Внешний вид и устройство мощного гидрогенератора

На тепловых электростанциях ротор генератора вращается с помощью паровой турбины, на гидроэлектростанциях — с помощью водяной турбины.

На рисунке 132, *а* изображён внешний вид мощного гидрогенератора, а на рисунке 132, *б* схематично показано его устройство, где цифрой *1* обозначен *статор*, цифрой *2* — *ротор*, а цифрой *3* — *водяная турбина*.

Ротор гидрогенератора имеет не одну, а несколько пар магнитных полюсов. Чем больше пар полюсов, тем больше частота переменного электрического тока, вырабатываемого генератором при данной скорости вращения ротора. Поскольку скорость вращения водяных турбин обычно невелика, то для создания тока стандартной частоты используют многополюсные роторы.

Стандартная частота переменного тока, применяемого в промышленности и осветительной сети в России и многих других странах, равна 50 Гц. Это означает, что на протяжении 1 с ток 50 раз течёт в одну сторону и 50 раз в другую. В некоторых странах (например, США) стандартная частота переменного тока равна 60 Гц.

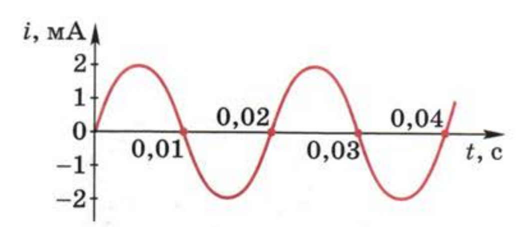


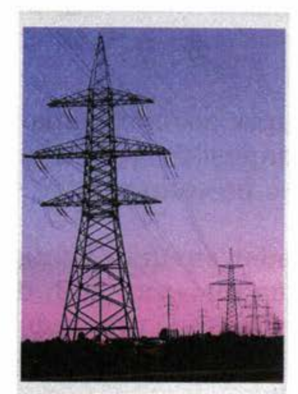
Рис. 133. График зависимости силы переменного тока от времени

Сила тока, вырабатываемого генераторами переменного тока, меняется со временем по гармоническому закону (т. е. по закону синуса или косинуса). На рисунке 133 показан график изменения силы тока i со временем t.

Для передачи электроэнергии от электростанций в места её потребления служат линии электропередачи (ЛЭП). Чем дальше от электростанции находится потребитель тока, тем больше энергии Q тратится на нагревание проводов и тем меньше доходит до потребителя:

$$E_{\text{потребляемая}} = E_{\text{генерируемая}} - Q.$$

Уменьшение потерь электроэнергии при её передаче от электростанций к потребителям является важной задачей экономики.



Современные высоковольтные ЛЭП

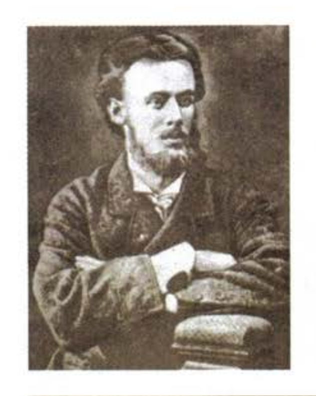
Из закона Джоуля—Ленца ($Q = I^2Rt$) следует, что уменьшить потери можно за счёт уменьшения сопротивления R проводов и силы тока I в них (что более эффективно, поскольку при уменьшении I в n раз Q уменьшается в n^2 раз).

Сопротивление проводов будет тем меньше, чем больше площадь S их поперечного сечения и чем меньше удельное сопротивление ρ металла, из которого они изготовлены $\left(\text{так как } R = \frac{\rho l}{S}\right)$. Провода делают из меди или алюминия, так как среди относительно недорогих металлов они обладают наименьшим удельным сопротивлением. Увеличивать толщину проводов экономически невыгодно (ввиду увеличения расхода металла) и неудобно (из-за трудностей при их подвеске).



Первые ЛЭП

Поэтому существенного снижения потерь Q можно добиться только за счёт уменьшения силы тока I. Но при этом необходимо во столь-



ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ ЯБЛОЧКОВ

(1847—1894)

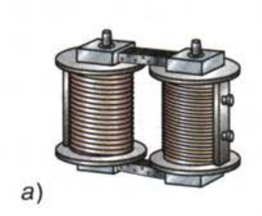
Русский электротехник и изобретатель. Изобрёл дуговую лампу («свеча Яблочкова»), сконструировал первый генератор переменного тока, трансформатор, сделал изобретения в области электрических машин и химических источников тока

ко же раз увеличить получаемое от генератора напряжение U, чтобы не снижать мощность тока P (так как $P = UI$[1]). Без такого преобразования силы тока и напряжения передача электроэнергии на большие расстояния становится невыгодной из-за существенных потерь.

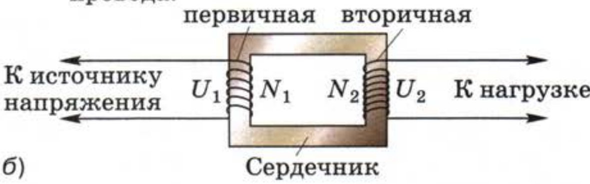
Решение этой важнейшей технической задачи стало возможным только после изобретения ***трансформатора*** — устройства, предназначенного для увеличения или уменьшения переменного напряжения и силы тока.

Трансформатор был изобретён в 1876 г. русским учёным ***Павлом Николаевичем Яблочковым.*** В основе его работы лежит явление электромагнитной индукции. На рисунке 134, *а* показан внешний вид трансформатора, а на рисунке 134, *б* схематично изображены его основные части. Обратите внимание на то, что число витков в обмотках различно: в данном случае $N_2 > N_1$.

Протекающий в первичной обмотке переменный ток создаёт (главным образом в сердеч-



а)



б)

Рис. 134. Внешний вид и схема устройства повышающего трансформатора

---

[1] U, I — так называемые ***действующие*** значения напряжения и силы переменного тока. Они равны соответственно напряжению и силе *постоянного* тока, выделяющего в проводнике ежесекундно столько же тепла, что и переменный ток. Действующие значения напряжения и силы переменного тока в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$.

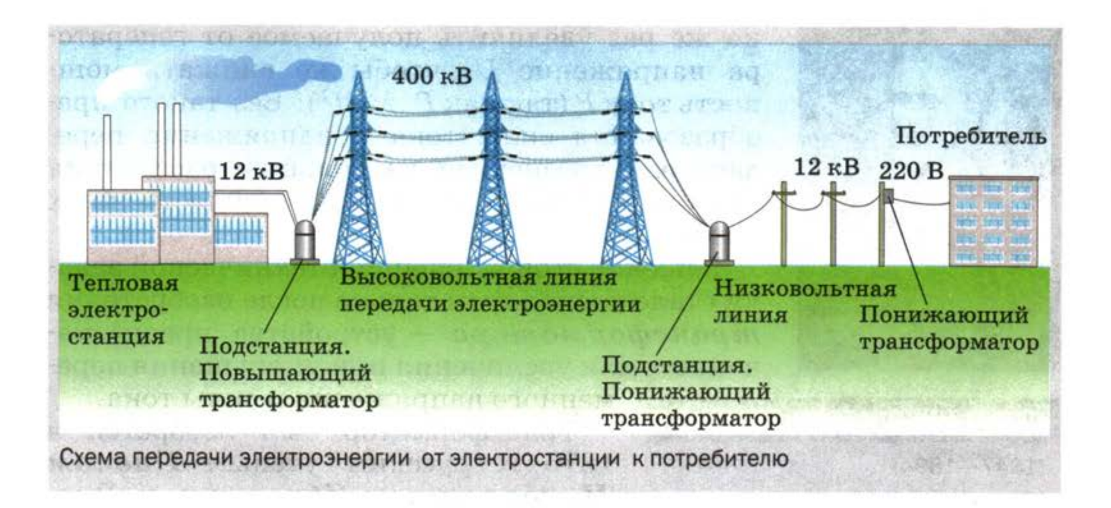


Схема передачи электроэнергии от электростанции к потребителю

нике) переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле. В результате действия этого поля на концах вторичной обмотки возникает переменное напряжение U_2.

Величина U_2 определяется из соотношения:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{или} \quad U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1.$$

Значит, при $N_2 > N_1$ трансформатор будет *повышающим* (так как $U_2 > U_1$), а при $N_2 < N_1$ — *понижающим* (в данном случае $U_2 < U_1$).


Внешний вид силового масляного трансформатора

Теперь вернёмся к вопросу о передаче электроэнергии от электростанции к месту её потребления. Напряжение, вырабатываемое генератором, обычно не превышает 25 кВ. А для оптимальной передачи электроэнергии на большие расстояния требуется напряжение порядка сотен киловольт. Поэтому ток с электростанции сначала подаётся на расположенную неподалёку повышающую трансформаторную подстанцию, где напряжение повышается до нескольких сотен киловольт (в большинстве случаев оно не превышает 750 кВ), и под таким напряжением подаётся в ЛЭП. Поскольку

такое высокое напряжение не может быть предложено потребителю, то в конце линии его подают поочерёдно на несколько трансформаторных подстанций, понижающих напряжение до 380 или 220 В, а затем — на предприятия или в жилые дома.

Трансформаторы нашли широкое применение в быту. Например, при подзарядке сотового телефона имеющийся в зарядном устройстве трансформатор понижает напряжение, полученное из осветительной сети и равное 220 В, до 5,5 В, пригодного для телефона. В телевизоре имеется несколько трансформаторов (как понижающих, так и повышающих), поскольку для питания различных его узлов требуется напряжение от 1,5 В до 25 кВ.



1. Какой электрический ток называется переменным? С помощью какого простого опыта его можно получить? **2.** Где используют переменный электрический ток? **3.** Расскажите об устройстве и принципе действия промышленного генератора. **4.** Чем приводится во вращение ротор генератора на тепловой электростанции; на гидроэлектростанции? **5.** Почему в гидрогенераторах используют многополюсные роторы? **6.** По какому физическому закону можно определить потери электроэнергии в ЛЭП и за счёт чего их можно уменьшить? **7.** Для чего при уменьшении силы тока во столько же раз повышают его напряжение перед подачей в ЛЭП? **8.** Расскажите об устройстве, принципе действия и применении трансформатора.

УПРАЖНЕНИЕ 39

1. Электростанции России вырабатывают переменный ток частотой 50 Гц. Определите период этого тока.

2*. По графику (см. рис. 133) определите период, частоту и амплитуду колебаний силы тока i.

§ 43 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Явление электромагнитной индукции было открыто Фарадеем в 1831 г.

В том же году в Англии родился ***Джеймс Максвелл***, ставший впоследствии учёным и



ДЖЕЙМС МАКСВЕЛЛ

(1831—1879)

Английский физик. Теоретически предсказал существование электромагнитных волн, определил, что в вакууме они должны распространяться со скоростью света. Создал теорию электромагнитного поля

сделавший важнейшее научное открытие, которое позволило глубже понять сущность явления электромагнитной индукции.

Напомним, что согласно явлению электромагнитной индукции при изменении магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого проводника, в этом проводнике возникает индукционный ток. Но ток может возникнуть только при наличии электрического поля.

Предположение о возникновении электрического поля в результате изменения магнитного сразу вызвало у учёных ряд вопросов. Например: отличается ли оно от поля, созданного неподвижными электрическими зарядами?

Возникает ли это поле только в проводнике или существует и в пространстве вокруг него? Играет какую-либо роль в возникновении электрического поля замкнутый проводник, по которому протекает индукционный ток, или оно существует в пространстве независимо от наличия проводника?

Ответы на эти и другие вопросы были получены в 1865 г., когда Максвелл создал теорию электромагнитного поля. Он теоретически доказал, что *всякое изменение со временем магнитного поля приводит к возникновению переменного электрического поля, а всякое изменение со временем электрического поля порождает переменное магнитное поле*.

Эти порождающие друг друга переменные электрическое и магнитное поля образуют единое ***электромагнитое поле***.

Источником электромагнитного поля служат ускоренно движущиеся электрические заряды.

Если электрические заряды движутся с ускорением, например колеблются, то создаваемое ими электрическое поле периодически меняется. Переменное электрическое поле создаёт в пространстве переменное магнитное поле,

которое, в свою очередь, порождает переменное электрическое и т. д.

Переменное электрическое поле называется ***вихревым***, поскольку его силовые линии замкнуты подобно линиям индукции магнитного поля. Это отличает его от поля *электростатического* (т. е. постоянного, не меняющегося во времени), которое существует вокруг неподвижных заряженных тел. Силовые линии электростатического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных.

Открытие электромагнитного поля позволило более детально описать механизм возникновения индукционного тока. Во всех опытах по получению индукционного тока (см. § 39) тем или иным образом изменялся магнитный поток, пронизывающий контур замкнутого проводника. При этом, согласно теории Максвелла, возникало вихревое электрическое поле, под действием которого свободные заряды, всегда имеющиеся в проводнике, приходили в направленное движение. В данном случае проводник, замкнутый на гальванометр, играл лишь роль индикатора, обнаруживающего возникшее в данной области пространства электрическое поле. *Электрическое поле существует независимо от наличия проводника.*

Созданная Максвеллом теория, позволившая предсказать существование электромагнитного поля за 22 года до того, как оно было обнаружено экспериментально, считается величайшим из научных открытий, роль которого в развитии науки и техники трудно переоценить.

? Вопросы

1. Кем и когда была создана теория электромагнитного поля и в чём заключалась её суть? **2.** Что служит источником электромагнитного поля? **3.** Чем отличаются силовые линии вихревого электрического поля от силовых линий электростатического? **4.** Опишите механизм возникновения индукционного тока, опираясь на знание о существовании электромагнитного поля.

УПРАЖНЕНИЕ 40

В опыте, изображённом на рисунке 120, при замыкании ключа сила тока, протекающего через катушку A, в течение некоторого промежутка времени увеличивалась. При этом в цепи катушки C возникал кратковременный ток. Отличаются ли чем-нибудь электрические поля, под действием которых возникали токи в катушках A и C? Существовали бы эти поля в момент замыкания ключа, если бы не было катушки C с гальванометром?

§ 44 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Из созданной Максвеллом теории можно сделать вывод о том, что быстропеременное электромагнитное поле должно распространяться в пространстве в виде поперечных волн. Причём эти волны могут существовать не только в веществе, но и в вакууме. Опираясь исключительно на теоретические выводы, Максвелл определил также, что электромагнитные волны должны распространяться в вакууме со скоростью 300 000 км/с, т. е. со скоростью света (скорость света, как известно, была измерена задолго до этого).

Вы уже знаете, что в механических волнах, например в звуковых, энергия передаётся от одних частиц среды к другим. При этом частицы приходят в колебательное движение, т. е. их смещение от положения равновесия периодически меняется. Для передачи звука обязательно нужна вещественная среда.

В связи с тем, что электромагнитные волны распространяются в веществе и в вакууме, возникает вопрос: что совершает колебания в электромагнитной волне, т. е. какие физические величины периодически меняются в ней?

Электромагнитная волна представляет собой систему порождающих друг друга и распространяющихся в пространстве переменных электрического и магнитного полей.

Напомним, что количественной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции $\vec{B}$.

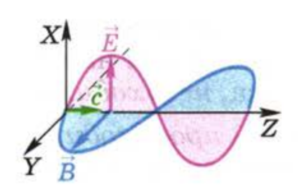


Рис. 135. Модель электромагнитной волны: $\vec{E}$ — напряжённость электрического поля, $\vec{B}$ — индукция магнитного поля; $\vec{c}$ — скорость волны

Основной количественной характеристикой электрического поля служит векторная величина, называемая ***напряжённостью электрического поля***, которая обозначается символом $\vec{E}$. *Напряжённость $\vec{E}$ электрического поля в какой-либо его точке равна отношению силы $\vec{F}$, с которой поле действует на точечный положительный заряд, помещённый в эту точку, к значению этого заряда q.*

Когда говорят, что магнитное и электрическое поля меняются, то это означает, что меняются соответственно вектор индукции магнитного поля $\vec{B}$ и вектор напряжённости электрического поля $\vec{E}$.

В электромагнитной волне именно векторы $\vec{B}$ и $\vec{E}$ периодически меняются по модулю и по направлению, т. е. колеблются.

На рисунке 135 изображены вектор напряжённости электрического поля $\vec{E}$ и вектор индукции магнитного поля $\vec{B}$ электромагнитной волны в один и тот же момент времени. Это как бы «моментальный снимок» волны, распространяющейся в направлении оси Z. Плоскость, проведённая через векторы $\vec{B}$ и $\vec{E}$ в любой точке, перпендикулярна направлению распространения волны, что говорит о поперечности волны.

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$$

За время, равное периоду колебаний, волна переместится вдоль оси Z на расстояние, равное длине волны. Для электромагнитных волн справедливы те же соотношения между длиной волны λ, её скоростью c, периодом T и частотой ν колебаний, что и для механических волн:

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}.$$

Максвелл не только научно обосновал возможность существования электромагнитных волн, но и указал, что *для создания интенсив-*



ГЕНРИХ ГЕРЦ

(1857—1894)

Немецкий физик, один из основоположников электродинамики. Экспериментально доказал существование электромагнитных волн

ной электромагнитной волны, которую можно было бы зарегистрировать приборами на некотором расстоянии от источника, *необходимо, чтобы колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ происходили с достаточно высокой частотой* (порядка 100 000 колебаний в секунду и больше).

В 1888 г. немецкому учёному ***Генриху Герцу*** удалось получить и зарегистрировать электромагнитные волны. В результате опытов Герца были также обнаружены все свойства электромагнитных волн, теоретически предсказанные Максвеллом.

Всё окружающее нас пространство буквально пронизано электромагнитными волнами различных частот. В настоящее время все электромагнитные волны разделены по длинам волн (и соответственно по частотам) на шесть основных диапазонов, которые представлены на рисунке 136.

Границы диапазонов весьма условны, поэтому, как видно из рисунка, в большинстве случаев соседние диапазоны несколько перекрывают друг друга.

Электромагнитные волны разных частот отличаются друг от друга проникающей способностью, скоростью распространения в веще-

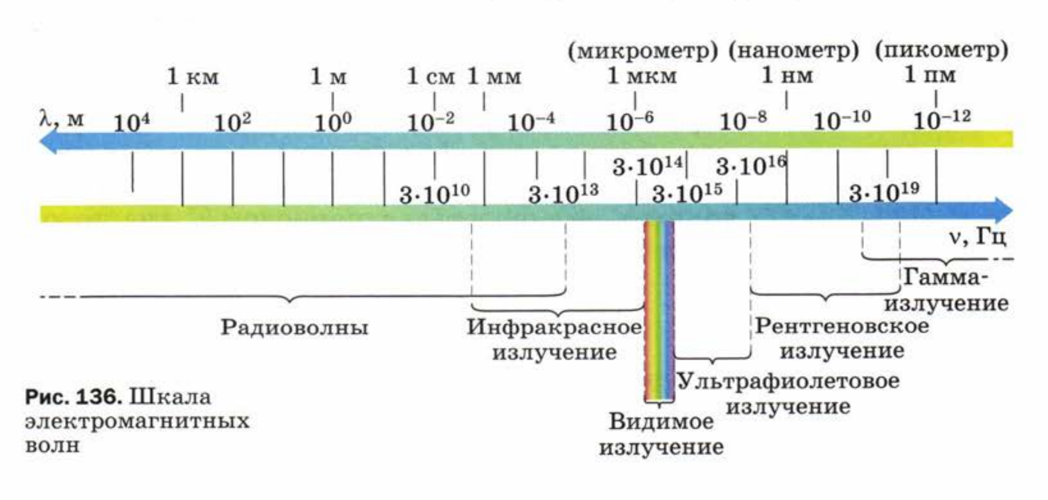


Рис. 136. Шкала электромагнитных волн

стве, видимостью, цветностью и некоторыми другими свойствами.

Они могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на живые организмы. Например, инфракрасное, т. е. тепловое, излучение играет определяющую роль в поддержании жизни на Земле, поскольку люди, животные и растения могут существовать и нормально функционировать только при определённых температурах.

Видимый свет даёт нам информацию об окружающем мире и возможность ориентироваться в пространстве. Он необходим также для протекания процесса фотосинтеза в растениях, в результате чего выделяется кислород, необходимый для дыхания живых организмов.

Влияние на человека ультрафиолетового излучения (вызывающего загар) в большой степени определяется интенсивностью и продолжительностью облучения. В допустимых дозах оно повышает сопротивляемость организма человека к различным заболеваниям, в частности инфекционным. Превышение допустимой дозы может вызвать ожоги кожи, развитие онкологических заболеваний, ослабление иммунитета, повреждение сетчатки глаз. Глаза можно защитить с помощью стеклянных очков (как тёмных, так и прозрачных, но не пластиковых), так как стекло поглощает значительную часть ультрафиолетовых лучей.

Вы знакомы и с рентгеновским излучением, в частности с его широким применением в медицине — флюорографическое обследование или рентгеновский снимок наверняка делали каждому из вас. Но слишком большие дозы или частые обследования с помощью рентгеновских лучей могут вызвать серьёзные заболевания.

Получение электромагнитных волн имеет огромное научное и практическое значение. В этом можно убедиться на примере всего лишь одного диапазона — радиоволн, приме-

няемых для телевизионной и радиосвязи, в радиолокации (т. е. для обнаружения объектов и измерения расстояния до них), в радиоастрономии и других сферах деятельности.



Вопросы

1. Какие выводы относительно электромагнитных волн можно сделать из теории Максвелла? 2. Какие физические величины периодически меняются в электромагнитной волне? 3. Какие соотношения между длиной волны, её скоростью, периодом и частотой колебаний справедливы для электромагнитных волн? 4. При каком условии волна будет достаточно интенсивной для того, чтобы её можно было зарегистрировать? 5. Когда и кем были впервые получены электромагнитные волны? 6. Приведите примеры применения разных диапазонов электромагнитных волн и их воздействия на живые организмы.

УПРАЖНЕНИЕ 41

1. На какой частоте суда передают сигнал бедствия SOS, если по международному соглашению длина радиоволны должна быть 600 м?
2. Радиосигнал, посланный с Земли на Луну, может отразиться от поверхности Луны и вернуться на Землю. Предложите способ измерения расстояния между Землёй и Луной с помощью радиосигнала.

   Указание: задача решается таким же методом, каким измеряется глубина моря с помощью эхолокации (см. § 30).
3. Можно ли измерить расстояние между Землёй и Луной с помощью звуковой или ультразвуковой волны? Ответ обоснуйте.

§ 45 КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР. ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Радиовещание (т. е. передача звуковой информации на большие расстояния) осуществляется посредством электромагнитных волн, излучаемых антенной радиопередающего устройства. Напомним, что источником электромагнитных волн являются ускоренно движущиеся заряженные частицы. Значит, для того чтобы антенна излучала электромагнитные волны, в ней нужно возбуждать колебания свободных электронов. Такие колебания называются ***электромагнитными*** (поскольку они порождают электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве в виде электромагнитных волн).

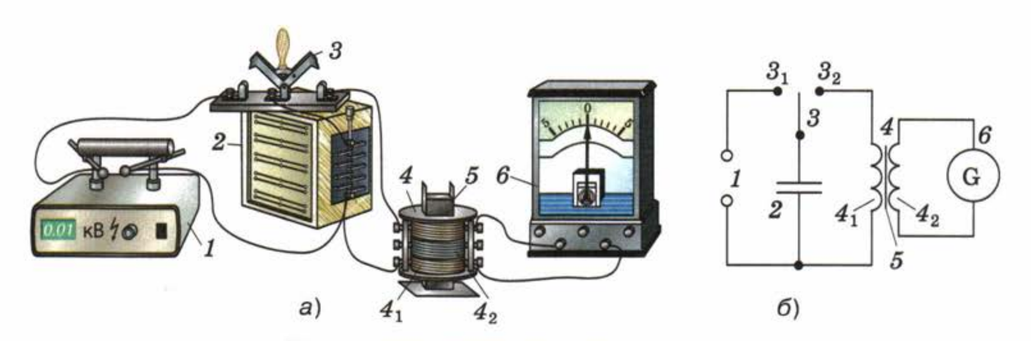
Для создания мощной электромагнитной волны, которую можно было бы зарегистрировать приборами на больших расстояниях от излучающей её антенны, необходимо, чтобы частота волны была не меньше 0,1 МГц (10^5 Гц)[1]. Колебания таких больших частот невозможно получить от генератора переменного электрического тока. Поэтому они подаются на антенну от *генератора высокочастотных электромагнитных колебаний*, имеющегося в каждом радиопередающем устройстве.

Одной из основных частей генератора является ***колебательный контур*** — колебательная система, в которой могут существовать свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур состоит из конденсатора (или батареи конденсаторов) и проволочной катушки.

Получить свободные электромагнитные колебания и удостовериться в их существовании можно с помощью установки, изображённой на рисунке 137.

Катушка *4* с сердечником *5* (рис. 137, *а*) состоит из двух обмоток: первичной 4_1 (из 3600 витков) и вторичной 4_2 (расположенной поверх

Рис. 137. Установка для получения свободных электромагнитных колебаний



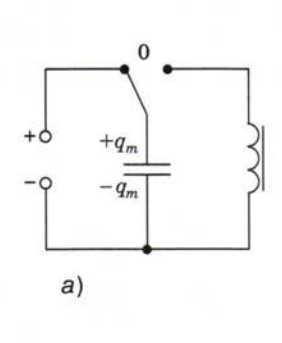
[1] Дальность распространения волны зависит от её мощности P, а мощность — от частоты ν: $P \sim \nu^4$. Из этой зависимости следует, что уменьшение частоты волны, например, всего лишь в 2 раза приведёт к уменьшению её мощности в 16 раз и соответствующему уменьшению дальности распространения.

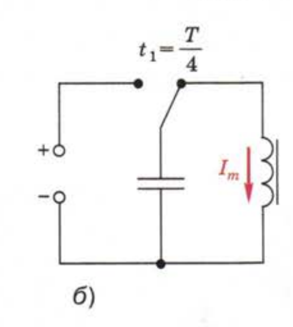
первичной в средней её части и имеющей 40 витков).

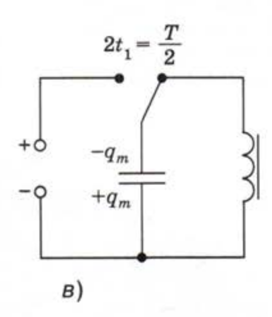
Первичная обмотка катушки и батарея конденсаторов *2*, соединённые друг с другом через переключатель *3*, составляют *колебательный контур*. Вторичная обмотка замкнута на гальванометр *6*, который будет регистрировать возникновение колебаний в контуре.

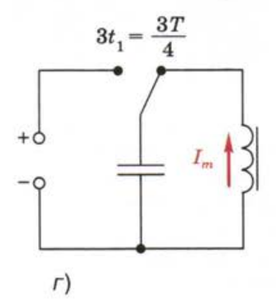
Поставим переключатель в положение 3_1 (рис. 137, *б*), соединив батарею конденсаторов с источником постоянного тока *1*. Батарея зарядится от источника. Перекинем переключатель в положение 3_2, соединив батарею с катушкой. При этом стрелка гальванометра совершит несколько затухающих колебаний, отклоняясь от нулевого деления то в одну, то в другую сторону, и остановится на нуле.

Чтобы объяснить наблюдаемое явление, обратимся к рисунку 138. Пусть при зарядке от источника тока (переключатель в положении 3_1) конденсатор получил некоторый максимальный заряд q_m. Допустим, при этом верх-









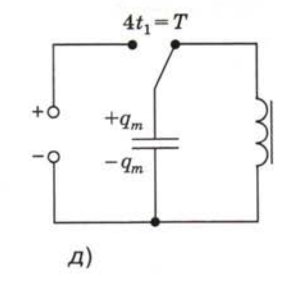


Рис. 138. Объяснение возникновения и существования электромагнитных колебаний в колебательном контуре

няя его обкладка зарядилась положительно, а нижняя — отрицательно (рис. 138, *а*). Между обкладками возникло напряжение U_m и электрическое поле, обладающее энергией $E_{эл\ m}$.

При замыкании на катушку (переключатель в положении $З_2$) в момент, который примем за начало отсчёта времени, конденсатор начинает разряжаться, и в контуре появляется электрический ток. Сила тока увеличивается постепенно, так как возникший в катушке ток самоиндукции направлен против тока, созданного разряжающимся конденсатором.

Через некоторый промежуток времени t_1 от начала разрядки конденсатор полностью разрядится — его заряд, напряжение между обкладками и энергия электрического поля будут равны нулю (рис. 138, *б*). Но, согласно закону сохранения энергии, энергия электрического поля не исчезла — она перешла в энергию магнитного поля тока катушки, которая в этот момент достигает максимального значения $E_{маг\ m}$. Наибольшему значению энергии соответствует и наибольшая сила тока I_m.

Поскольку конденсатор разряжен, сила тока в контуре начинает уменьшаться. Но теперь ток самоиндукции направлен в ту же сторону, что и ток разряжавшегося конденсатора, и препятствует его уменьшению. Благодаря току самоиндукции к моменту времени $2t_1$ от начала разрядки конденсатор перезарядится: его заряд вновь будет равен q_m, но теперь верхняя обкладка будет заряжена отрицательно, а нижняя — положительно (рис. 138, *в*).

Понятно, что через промежуток времени, равный $3t_1$, конденсатор вновь будет разряжен (рис. 138, *г*), а через $4t_1$ будет заряжен так же, как в момент начала разрядки (рис. 138, *д*).

За промежуток времени, равный $4t_1$, произошло одно полное колебание. Значит, $T = 4t_1$, где T — период колебаний (а t_1, $2t_1$, $3t_1$ — соот-

ветственно четверть, половина и три четверти периода).

При периодическом изменении в катушке 4_1 силы тока и его направления соответственно меняется и создаваемый этим током магнитный поток, пронизывающий катушку 4_2. При этом в ней возникает переменный индукционный ток, регистрируемый гальванометром. Исходя из того что стрелка гальванометра совершила несколько затухающих колебаний и остановилась на нуле, можно сделать вывод, что электромагнитные колебания тоже были затухающими. Энергия, полученная контуром от источника тока, постепенно расходовалась на нагревание проводящих частей контура. Когда запас энергии иссяк, колебания прекратились.

Напомним, что колебания, происходящие только благодаря начальному запасу энергии, называются свободными. Период свободных колебаний равен собственному периоду колебательной системы, в данном случае периоду колебательного контура. Формула для определения периода свободных электромагнитных колебаний была получена английским физиком ***Уильямом Томсоном*** в 1853 г. Она называется ***формулой Томсона*** и выглядит так:

$T = 2\pi\sqrt{LC}$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Из данной формулы следует, что период колебательного контура определяется параметрами составляющих его элементов: индуктивностью катушки и ёмкостью конденсатора. Например, при уменьшении ёмкости или индуктивности период колебаний должен уменьшиться, а их частота — увеличиться. Проверим это на опыте. Уменьшим ёмкость батареи, отключив от неё несколько конденсаторов. Мы увидим, что колебания стрелки гальванометра участились.

В начале параграфа отмечалось, что подаваемые в антенну высокочастотные колебания необходимы для создания электромагнитных волн. Но для того чтобы волна излучалась в течение длительного времени, нужны незатухающие колебания. Для создания в контуре незатухающих колебаний необходимо восполнять потери энергии, периодически подключая конденсатор к источнику тока. В генераторе это осуществляется автоматически.

? Вопросы

1. Для чего электромагнитные волны подаются в антенну? 2. Почему в радиовещании используются электромагнитные волны высокой частоты? 3. Что представляет собой колебательный контур? 4. Расскажите о цели, ходе и наблюдаемом результате опыта, изображённого на рисунке 137. Каким образом гальванометр мог регистрировать происходящие в этом контуре колебания? 5. Какие преобразования энергии происходят в результате электромагнитных колебаний? 6. Почему ток в катушке не прекращается в тот момент, когда конденсатор разряжен? 7. От чего зависит собственный период колебательного контура? Как его можно изменить?

УПРАЖНЕНИЕ 42

Колебательный контур состоит из конденсатора переменной ёмкости и катушки. Как получить в этом контуре электромагнитные колебания, периоды которых отличались бы в 2 раза?

§ 46 ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Передача и приём информации посредством электромагнитных волн называется ***радиосвязью***. Линии радиосвязи используют, например, для осуществления радиотелефонной связи, передачи телеграмм, факсимиле (факсов), радиовещательных и телевизионных программ.

Радиосвязь представляет собой довольно сложный процесс. Поэтому рассмотрим лишь наиболее общие принципы одного из её видов — радиотелефонной связи, т. е. передачи звуковой информации, например речи и музыки, с помощью электромагнитных волн.

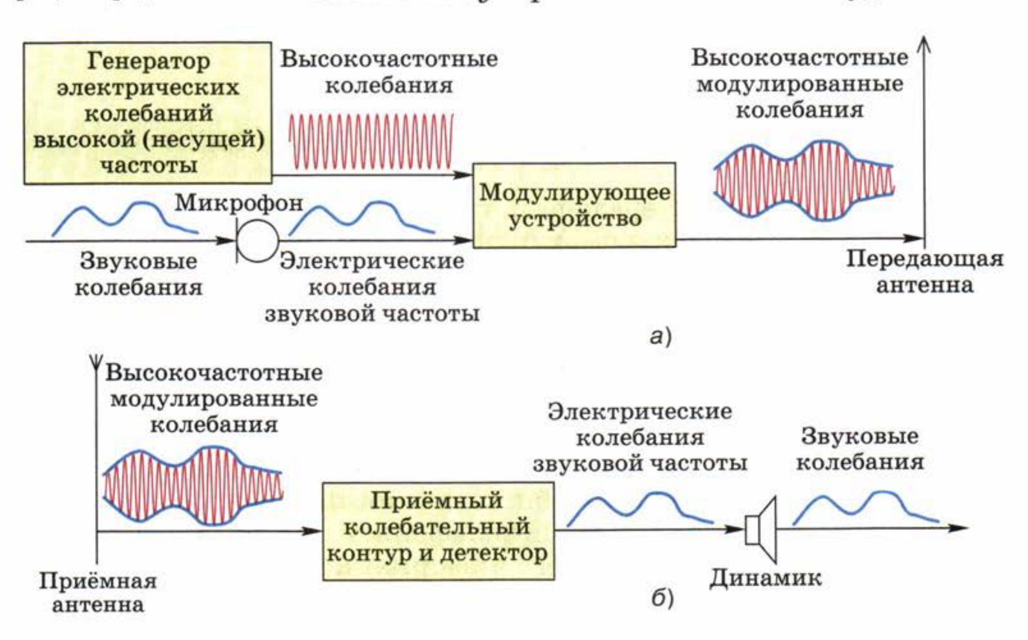
Для получения целостного представления об этом процессе обратимся к блок-схеме, представленной на рисунке 139.

На рисунке 139, *а* изображено *передающее устройство*, состоящее из генератора высокочастотных колебаний, микрофона, модулирующего устройства и передающей антенны.

В микрофон поступают звуковые колебания (речь, музыка и т. д.). Они преобразуются микрофоном в электрические колебания такой же формы, какую имеют звуковые. Из микрофона низкочастотные электрические колебания поступают в модулирующее устройство. Туда же из генератора подаются высокочастотные колебания постоянной амплитуды.

В модулирующем устройстве амплитуду высокочастотных колебаний изменяют (модулируют) с помощью электрических колебаний звуковой частоты. В результате амплитуда становится переменной, причём меняется она точно так же, как и поступающие из микрофона электрические колебания. Такие высокочастотные *модулированные* по амплитуде колеба-

Рис. 139. Блок-схема процесса радиосвязи



ния несут в себе информацию о форме звукового сигнала. Поэтому частота высокочастотных колебаний называется *несущей.*

Процесс изменения амплитуды высокочастотных колебаний с частотой, равной частоте звукового сигнала, называется амплитудной модуляцией.

Под воздействием высокочастотных модулированных колебаний в передающей антенне возникает переменный ток высокой частоты. Этот ток порождает в пространстве вокруг антенны электромагнитное поле, которое распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн и достигает антенн радиоприёмных устройств.

Вы уже знаете о том, что мощность электромагнитной волны пропорциональна четвёртой степени её частоты: $P \sim \nu^4$.

Электромагнитные волны звуковых, т. е. низких, частот (от 16 до 20 000 Гц) имеют малую мощность и после излучения очень быстро затухают. Этим и вызвана необходимость использования модулированных радиоволн, которые благодаря высокой несущей частоте распространяются на большие расстояния и при этом содержат информацию о форме передаваемых звуковых колебаний.

Как видно из рисунка 139, *б*, радиоприёмное устройство состоит из приёмной антенны, приёмного резонирующего колебательного контура и *детектора* — элемента, пропускающего переменный ток только в одном направлении.

В приёмную антенну поступают волны от множества радиостанций. Но каждая радиостанция осуществляет вещание только на строго определённой, отведённой ей несущей частоте.

Настраивая свой радиоприёмник на частоту нужной радиостанции, вы меняете собственную частоту имеющегося в приёмнике колебательного контура так, чтобы она была равна несущей частоте данной радиостанции, т. е.

7 – Перышкин, 9 кл.

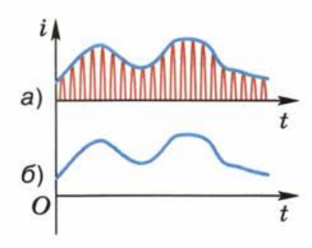


Рис. 140. Графики высокочастотных модулированных колебаний и звуковых колебаний

чтобы контур был настроен в резонанс с колебаниями, генерируемыми на данной радиостанции. При этом амплитуда колебаний выбранной радиостанции в контуре вашего приёмника будет максимальной по сравнению с амплитудами колебаний, поступивших от радиостанций, вещающих на других несущих частотах. В этом заключается второе назначение несущей частоты — она обеспечивает возможность настройки на частоту нужной радиостанции.

Принятые колебания сначала усиливают. Затем для преобразования высокочастотных модулированных колебаний в звуковые производят *детектирование*, т. е. процесс, обратный модуляции. Детектирование проводится в два этапа: сначала с помощью детектора (представляющего собой элемент с односторонней проводимостью) из высокочастотных модулированных колебаний получают высокочастотный пульсирующий ток (рис. 140, *а*), а затем в динамике этот ток сглаживается и преобразуется в колебания звуковых частот (рис. 140, *б*). На возможность использования электромагнитных волн для передачи радиосигналов[1] впервые указал в 1889 г. ***Александр Степанович Попов***. В 1896 г. при помощи сконструированных им передатчика и приёмника радиосигналов передал первую в мире радиограмму, состоящую из двух слов «Генрих Герц».



АЛЕКСАНДР СТЕПАНОВИЧ ПОПОВ

(1859—1906)

Русский физик, электротехник, изобретатель радио. Сконструировал генератор электромагнитных колебаний. Изобрёл приёмную антенну, построил первый в мире радиоприёмник

При передаче телевизионных программ высокочастотные колебания модулируются не только звуковым, но и видеосигналом. Это осуществляется с помощью телевизионной передающей трубки, которая преобразует оптическое изображение в электромагнитные колебания. Моду-

[1] *Радиосигналы* — электромагнитные волны, излучаемые в течение коротких промежутков времени в диапазоне частот от 10^4 до 10^{10} кГц.

лированные таким образом высокочастотные колебания заключают в себе информацию и о звуке, и об изображении.

В телевидении используются более высокие (порядка миллиардов герц) несущие частоты.



1. Что называется радиосвязью? **2.** Приведите 2—3 примера использования линий радиосвязи. **3.** Используя рисунки 139 и 140, расскажите о принципах осуществления радиотелефонной связи. **4.** Частота каких колебаний называется несущей? **5.** В чём заключается процесс амплитудной модуляции электрических колебаний? **6.** Почему в радиосвязи не используются электромагнитные волны звуковых частот? **7.** В чём заключается процесс детектирования колебаний?

УПРАЖНЕНИЕ 43

Период колебаний зарядов в антенне, излучающей радиоволны, равен 10^{-7} с. Определите частоту этих радиоволн.

§ 47 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА

В начале XIX в. опытным путём была подтверждена справедливость гипотезы о волновой природе света. В то время ни о каких волнах, кроме механических, учёные ещё не знали. Поэтому считали, что свет, подобно звуку, представляет собой механическую упругую волну.

Вы уже знаете, что упругие волны могут возникать только в веществе, поскольку именно частицы вещества совершают упругие колебания, распространяющиеся в пространстве (вспомните опыт, доказывающий, что звук не распространяется в вакууме).

Значит, *если свет — упругая волна, то для его распространения нужна среда*.

Однако свет от звёзд доходит до нас через такие области космического пространства, где нет вещества. Учитывая этот факт, сторонники волновых воззрений на природу света выдвинули гипотезу о том, что всё мировое пространство заполнено некой невидимой упругой средой, которую они назвали *светоносным эфиром* (идея о существовании эфира была

высказана ещё в XVII в.). Считалось, что именно в этом эфире и распространяется свет.

В то же время предположение о существовании светоносного эфира порождало много противоречий и вопросов. Так, например, в конце второго десятилетия XIX в. было выяснено, что свет является поперечной волной. Известно, что упругие поперечные волны возникают только в твёрдых телах. Получалось, что светоносный эфир представляет собой твёрдое тело.

В связи с этим возникал вопрос о том, как планеты и другие небесные тела могут двигаться сквозь твёрдый эфир, не испытывая при этом никакого сопротивления.

Во второй половине XIX в. Максвелл создал теорию электромагнитного поля, согласно которой электромагнитные волны, подобно световым, являются поперечными и распространяются в вакууме со скоростью света. Исходя из того, что световые и электромагнитные волны обладают общими свойствами, Максвелл предположил, что *свет является частным проявлением электромагнитных волн*.

Дальнейшее развитие физики подтвердило это предположение. Стало ясно, что видимый свет — это только небольшой диапазон электромагнитных волн с длиной волны от $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ до $7{,}6 \cdot 10^{-7}$ м или с частотами от $4{,}0 \cdot 10^{14}$ до $8{,}0 \cdot 10^{14}$ Гц (см. рис. 136).

Тем не менее представление о том, что в некоторых случаях свет ведёт себя аналогично потоку частиц, не потеряло своей актуальности.

К началу XX в. выяснилось, что электродинамика Максвелла не позволяет объяснить некоторые экспериментальные факты. Противоречия между теорией и экспериментальными данными удалось разрешить, предположив, что свет обладает корпускулярными свойствами. В 1900 г. немецкий физик ***Макс Планк*** выдвинул гипотезу, что атомы испускают электромаг-



МАКС ПЛАНК

(1858—1947)

Немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики. Закон излучения Планка явился основой нового этапа развития физики

нитную энергию отдельными порция-ми — ***квантами***. Энергия E каждой порции прямо пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu,$$

где h — коэффициент пропорциональности, получивший название ***постоянной Планка***.

$E = h\nu$

В 1905 г. немецкий физик Альберт Эйнштейн выдвинул идею, согласно которой электромагнитные волны с частотой ν можно рассматривать как поток квантов излучения с энергией $E = h\nu$.

В настоящее время квант электромагнитного излучения называют также ***фотоном***. Фотон (от греч. phos, photos — свет) — это элементарная частица, являющаяся квантом электромагнитного излучения (в том числе света). Фотон не обладает ни массой, ни зарядом и всегда распространяется со скоростью света.

Таким образом, свет обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

С увеличением частоты электромагнитного излучения в большей степени проявляются его корпускулярные свойства, т. е. свойства, присущие потоку частиц, и в меньшей — волновые. Из всех диапазонов электромагнитных волн наиболее ярко выраженными корпускулярными свойствами обладает гамма-излучение (см. рис. 136). Подробнее о гамма-квантах вы узнаете из следующей главы.

? Вопросы **1.** Каковы были представления учёных о природе света в начале XIX в.? **2.** Чем была вызвана необходимость выдвижения гипотезы о существовании светоносного эфира? **3.** Какое предположение о природе света было сделано Максвеллом? Какие общие свойства света и электромагнитных волн явились основанием для такого предположения? **4.** Как называется частица электромагнитного излучения?

§ 48 ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА. ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

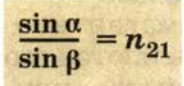
В курсе физики 8 класса вы познакомились с явлением преломления света. Теперь вы знаете, что свет представляет собой электромагнит-

ные волны определённого диапазона частот. Опираясь на знания о природе света, вы сможете понять физическую причину преломления и объяснить многие другие связанные с ним световые явления.

Согласно ***закону преломления света*** (рис. 141):

лучи падающий, преломлённый и перпендикуляр, проведённый к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{21}, \qquad (1)$$



где n_{21} — *относительный показатель преломления* второй среды относительно первой.

Если луч переходит в какую-либо среду из *вакуума*, то

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n, \qquad (2)$$

где n — *абсолютный показатель преломления* (или просто *показатель преломления*) второй среды. В этом случае первой «средой» является *вакуум, абсолютный показатель которого принят за единицу*.

Закон преломления света был открыт опытным путём голландским учёным ***Виллебордом Снеллиусом*** в 1621 г. Закон был сформулирован в трактате по оптике, который нашли в бумагах учёного после его смерти.

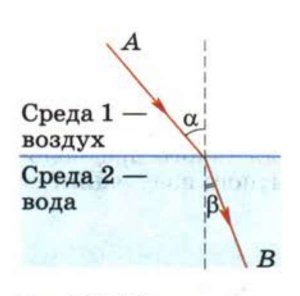


Рис. 141. Переходя из одной среды в другую, луч преломляется, т. е. меняет направление распространения

После открытия Снеллиуса несколькими учёными была выдвинута гипотеза о том, что *преломление света обусловлено изменением его скорости при переходе через границу двух сред*. Справедливость этой гипотезы была подтверждена теоретическими доказательствами, выполненными независимо друг от друга французским математиком ***Пьером Ферма*** (в 1662 г.) и голландским физиком ***Христианом Гюйгенсом*** (в 1690 г.). Разными путями

они пришли к одному и тому же результату, доказав, что

отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред, равная отношению скоростей света в этих средах:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \qquad (3)$$

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Из уравнения (3) следует, что если угол преломления β меньше угла падения α, то свет данной частоты во второй среде распространяется медленнее, чем в первой, т. е. $v_2 < v_1$. Это означает, что вторая среда является оптически более плотной, чем первая.

Взаимосвязь величин, входящих в уравнение (3), послужила веским основанием для появления ещё одной формулировки определения относительного показателя преломления:

относительным показателем преломления второй среды относительно первой называется физическая величина, равная отношению скоростей света в этих средах:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \qquad (4)$$

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Пусть луч света переходит из вакуума в какую-либо среду. Заменив в уравнении (4) v_1 на скорость света в вакууме c, а v_2 на скорость света в среде v, получим уравнение (5), являющееся определением абсолютного показателя преломления:

абсолютным показателем преломления среды называется физическая величина, равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}$$

$$n = \frac{c}{v}. \qquad (5)$$

Согласно уравнениям (4) и (5), n_{21} показывает, во сколько раз меняется скорость света при его переходе из одной среды в другую, а n — при переходе из вакуума в среду. В этом заключается *физический смысл показателей преломления*.

Значение абсолютного показателя преломления n любого вещества больше единицы (в этом убеждают данные, содержащиеся в таблицах физических справочников). Тогда, согласно уравнению (5), $c/v > 1$ и $c > v$, т. е. *скорость света в любом веществе меньше скорости света в вакууме*.

Не приводя строгих обоснований (они сложны и громоздки), отметим, что причиной уменьшения скорости света при его переходе из вакуума в вещество является взаимодействие световой волны с атомами и молекулами вещества. *Чем больше оптическая плотность вещества, тем сильнее это взаимодействие, тем меньше скорость света и тем больше показатель преломления.* Таким образом, **скорость света в среде и абсолютный показатель преломления определяются свойствами этой среды.**

По числовым значениям показателей преломления веществ можно сравнивать их оптические плотности. Например, показатели преломления различных сортов стекла лежат в пределах от 1,470 до 2,040, а показатель преломления воды равен 1,333. Значит, стекло — среда оптически более плотная, чем вода.

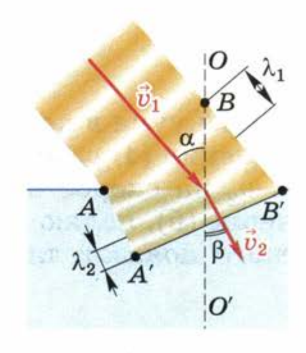


Рис. 142. При переходе световых волн из воздуха в воду скорость света уменьшается, фронт волны, а вместе с ним и её скорость меняют направление

Обратимся к рисунку 142, с помощью которого можно пояснить, почему на границе двух сред с изменением скорости меняется и направление распространения световой волны.

На рисунке изображена световая волна, переходящая из воздуха в воду и падающая на границу раздела этих сред под углом α. В воз-

духе свет распространяется со скоростью v_1, а в воде — с меньшей скоростью v_2.

Первой до границы доходит точка A волны. За промежуток времени Δt точка B, перемещаясь в воздухе с прежней скоростью v_1, достигнет точки B'. За то же время точка A, перемещаясь в воде с меньшей скоростью v_2, пройдёт меньшее расстояние, достигнув только точки A'. При этом так называемый фронт волны $A'B'$ в воде окажется повёрнутым на некоторый угол по отношению к фронту AB волны в воздухе. А вектор скорости (который всегда перпендикулярен к фронту волны и совпадает с направлением её распространения) поворачивается, приближаясь к прямой OO', перпендикулярной к границе раздела сред. При этом угол преломления β оказывается меньше угла падения α. Так происходит преломление света.

Из рисунка видно также, что при переходе в другую среду и повороте волнового фронта меняется и длина волны: при переходе в оптически более плотную среду уменьшается скорость, длина волны тоже уменьшается ($\lambda_2 < \lambda_1$). Это согласуется и с известной вам формулой $\lambda = v/\nu$, из которой следует, что при неизменной частоте ν (которая не зависит от плотности среды и поэтому не меняется при переходе луча из одной среды в другую) уменьшение скорости распространения волны сопровождается пропорциональным уменьшением длины волны.

? Вопросы

1. Какое из двух веществ является оптически более плотным? **2.** Как определяются показатели преломления через скорость света в средах? **3.** Где свет распространяется с наибольшей скоростью? **4.** Какова физическая причина уменьшения скорости света при его переходе из вакуума в среду или из среды с меньшей оптической плотностью в среду с большей? **5.** Чем определяются (т. е. от чего зависят) абсолютный показатель преломления среды и скорость света в ней? **6*.** Расскажите, что иллюстрирует рисунок 142.



УПРАЖНЕНИЕ 44

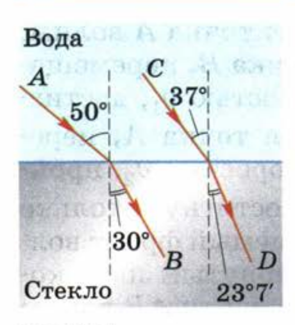


Рис. 143

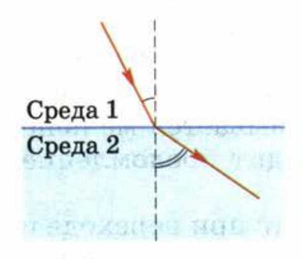


Рис. 144

1. Какие из трёх величин — длина волны, частота и скорость распространения волны — изменятся при переходе волны из вакуума в алмаз?

2. Используя рисунок 143, докажите, что относительный показатель преломления n_{21} для данных двух сред не зависит от угла падения луча света.

3. Какая из двух сред (рис. 144) обладает большей оптической плотностью? В какой из них луч света распространяется с большей скоростью? Ответ обоснуйте.

4*. Используя уравнения (4) и (5), докажите, что $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$, где n_1 — абсолютный показатель преломления первой среды, а n_2 — второй.

Указание: выразите из уравнения (5) скорость v света в среде через c и n; по аналогии с полученной формулой запишите формулы для определения скоростей v_1 и v_2, входящих в уравнение (4); замените в уравнении (4) v_1 и v_2 на соответствующие им буквенные выражения и упростите полученную формулу.

§ 49 ДИСПЕРСИЯ СВЕТА. ЦВЕТА ТЕЛ

Вы уже знаете, что абсолютный показатель преломления среды определяется её свойствами.

Являются ли свойства среды единственным фактором, определяющим показатель преломления, или существуют какие-либо другие причины, от которых он зависит?

Для ответа на этот вопрос проделаем опыт, изображённый на рисунке 145 (все изображённые на рисунке предметы размещены на классной доске с металлической основой и удерживаются на ней благодаря имеющимся на них магнитам). Разместим около объектива осветителя О диафрагму Д с горизонтальной щелью (расположенной перпендикулярно плоскости

чертежа) и синий светофильтр Ф (т. е. синее стекло). При этом на экране (роль которого выполняет укреплённая на доске и немного отогнутая бумажная полоска) на уровне световых лучей получится изображение щели синего цвета (на рисунке 145, *а* его положение обозначено символом $С_1$).

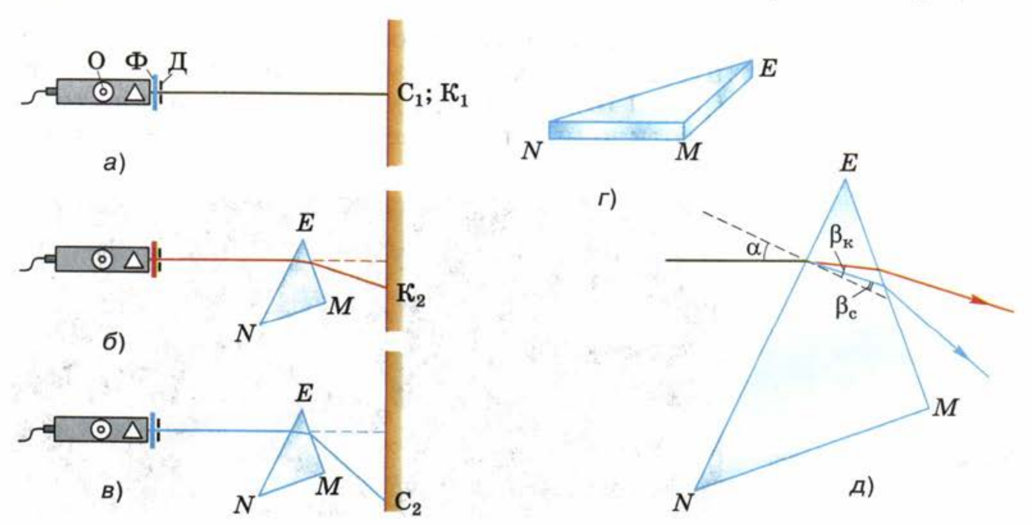
Заменим синий фильтр на красный — и на том же месте вместо синего изображения щели увидим красное $К_1$.

Теперь на пути красного светового пучка поставим треугольную стеклянную призму NEM (рис. 145, *б*; объёмное изображение призмы — на рис. 145, *г*). Проходя через призму, луч отклоняется в сторону более широкой её части NM, в результате чего изображение щели смещается вниз в положение $К_2$.

Проделаем тот же опыт, предварительно заменив красный светофильтр на синий (рис. 145, *в*). Мы обнаружим, что изображение щели, полученное в синих лучах, прошедших через призму, окажется в положении $С_2$, т. е. сместится в том же направлении, что и красное, но на большее расстояние.

Проведённый опыт свидетельствует о том, что лучи синего цвета, имеющие бо́льшую час-

Рис. 145. Наблюдение дисперсии света при преломлении в призме световых лучей разной частоты



тоту, чем красные, преломились сильнее красных. Это означает, что *абсолютный показатель преломления стекла, из которого изготовлена призма, зависит не только от свойств стекла, но и от частоты* (*от цвета*) *проходящего через него света.*

Из рисунка 145, *д* видно, что уже на грани NE призмы при одном и том же угле падения α синий луч преломился сильнее красного: $\beta_с < \beta_к$, значит, $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta_с} > \frac{\sin\alpha}{\sin\beta_к}$, т. е. $\boldsymbol{n_с > n_к}$. Соответственно *для синих лучей больше и оптическая плотность стекла, но скорость их распространения в стекле меньше скорости красных, поскольку скорость обратно пропорциональна показателю преломления*:

$$v = \frac{c}{n}.$$

Зависимость показателя преломления вещества и скорости света в нём от частоты световой волны называется дисперсией света.

Слово «дисперсия» происходит от латинского dispersio и означает «рассеяние, развеивание».

Теперь, убрав с осветителя фильтр, пропустим через призму пучок белого света (рис. 146). Мы увидим, что этот пучок не только отклонился к более широкой части призмы,

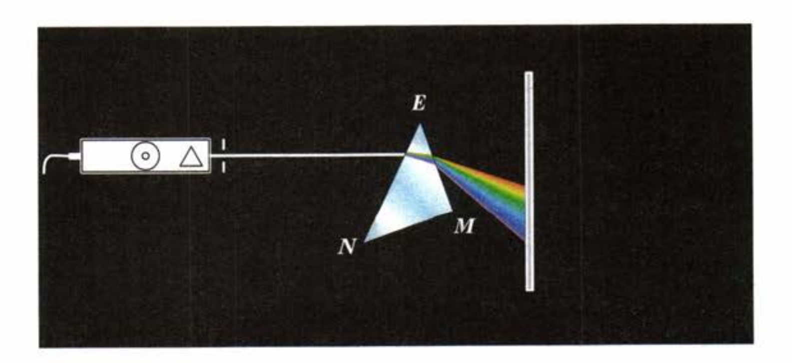


Рис. 146. Разложение пучка белого света в спектр

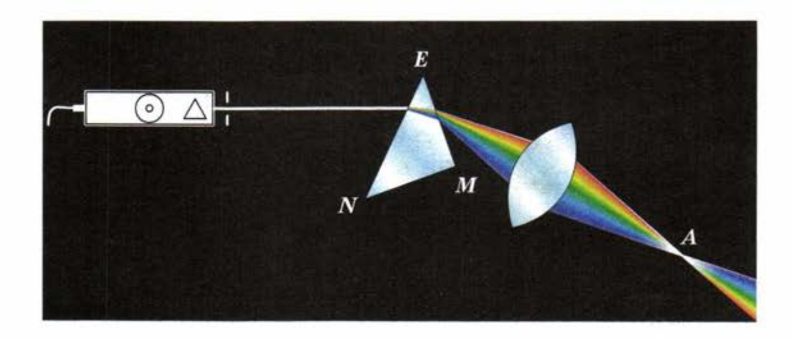


Рис. 147. Сложение спектральных цветов с помощью линзы

но и разложился в ***спектр***[1], в котором семь цветов — красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий и фиолетовый (как в радуге) — плавно переходят друг в друга.

Это наводит на мысль, что белый свет является сложным, состоящим из световых волн разных цветов (и соответственно разных частот).

Синий и красный лучи, выделенные в предыдущем опыте из белого света с помощью фильтров, при прохождении через призму не разлагались в спектр. Это говорит о том, что цветные лучи являются *простыми*, или, как их ещё называют, *монохроматическими* (от греческих слов monos — один, единственный и chromatikos — цветной, окрашенный). Свет каждого цвета представлен волнами настолько узкого интервала частот, что обычно его характеризуют одной определённой частотой.

Чтобы удостовериться, что призма не окрашивает, а именно разлагает белый свет, поставим на пути вышедшего из призмы и разложившегося в спектр пучка собирающую линзу (рис. 147). Мы увидим, что после преломления в линзе разноцветные лучи, пересекаясь в точке A, «складываются», приобретая белый цвет.

---

[1] В данном случае под спектром понимается совокупность частот или длин волн, содержащихся в излучении какого-либо вещества. (В общем случае в физике *спектр* — это совокупность всех значений какой-либо физической величины, характеризующей систему или процесс.)

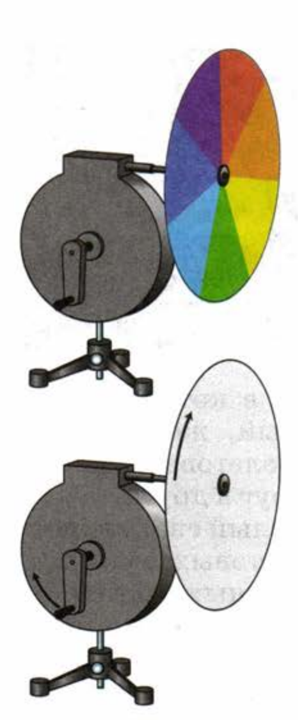


Рис. 148. Опыт по сложению спектральных цветов

Сложить спектральные цвета и получить белый цвет можно и на более простом опыте. Возьмём картонный диск с изображёнными на нём разноцветными секторами и укрепим его на валу центробежной машины (рис. 148). При быстром вращении диска создаётся впечатление, что он белый.

Зададимся вопросом, почему окружающие нас тела, освещённые одним и тем же солнечным светом, имеют разные цвета. В чём заключается физическая причина такого различия?

Чтобы выяснить это, проделаем опыт. С помощью установки, изображённой на рисунке 149, получим на белом экране (или на укреплённом на доске листе белой бумаги) спектр, изображённый на рисунке 150, *а*. Закроем правую часть спектра широкой бумажной полоской, например зелёного цвета. Мы увидим, что цвет полоски остаётся ярко-зелёным и не меняет оттенка только в той области, где на неё падают зелёные лучи. А при освещении лучами других цветов она либо меняет оттенок (в жёлтой части спектра), либо выглядит тёмной (рис. 150, *б*).

Значит, покрывающая полоску краска обладает способностью отражать только зелёный свет и поглощать свет всех остальных цветов.

Мы повторили с вами опыты, которые проделал И. Ньютон в 1666 г. Он пропускал через призму узкий пучок солнечного света, проходящего через маленькое отверстие в ставне.

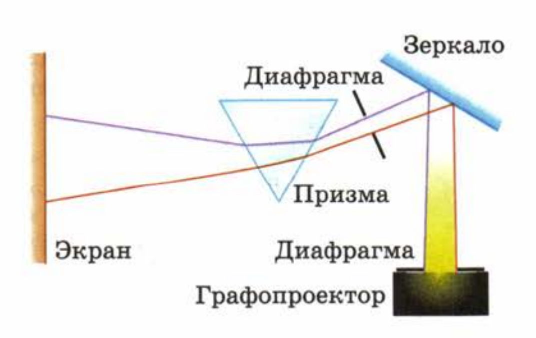


Рис. 149. Установка для получения сплошного спектра и объяснения того, почему окружающие нас тела, освещённые солнечным светом, имеют разные цвета

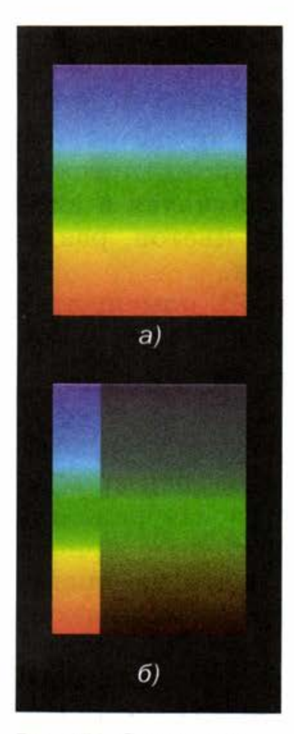


Рис. 150. Сплошной (непрерывный) спектр

В настоящее время для получения чётких и ярких спектров используют специальные оптические приборы.

На рисунке 151 показано устройство и внешний вид одного из таких приборов — двухтрубного спектроскопа.

Рассмотрим принцип действия спектроскопа. В трубе К (рис. 151, *а*), называемой *коллиматором,* имеется узкая щель *S*. Через эту щель исследуемый свет входит в прибор и расширяющимся пучком падает на линзу $Л_1$. Поскольку щель *S* расположена в фокальной плоскости этой линзы, то свет выходит из линзы параллельным пучком, а затем падает на призму П.

Так как волны разных цветов (т. е. разных частот) отклоняются призмой на разные углы, то из призмы выходят параллельные пучки разного направления (на рисунке показаны крайние лучи только двух пучков — красного и фиолетового). Эти пучки, преломившись в линзе $Л_2$, образуют в её фокальной плоскости $ЭЭ_1$ изображения щели *S*. Причём изображения, соответствующие волнам разных частот, приходятся на разные места плоскости $ЭЭ_1$.

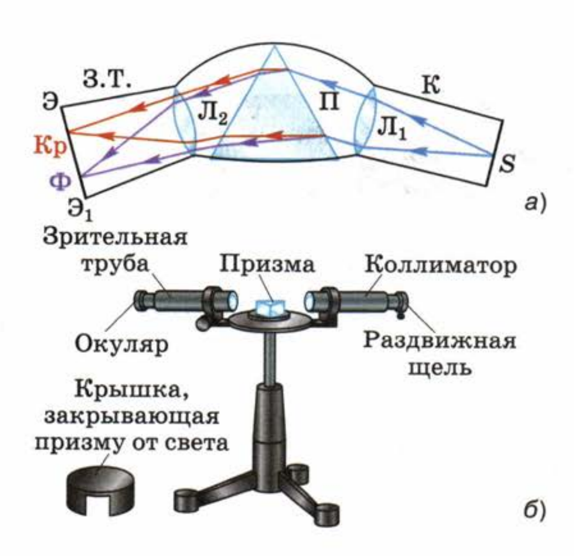


Рис. 151. Схема устройства и внешний вид двухтрубного спектроскопа

Если на щель падает белый свет, то все изображения щели сливаются в цветную полосу, в которой представлены все цвета.

Если же исследуемый свет представляет собой смесь нескольких монохроматических (простых) цветов, то спектр получится в виде узких линий соответствующих цветов, разделённых тёмными промежутками.

В спектрографе в плоскости $ЭЭ_1$ помещается фотопластинка, на которой получается фотография спектра. Фотография спектра называется *спектрограммой*.

Если же в плоскость $ЭЭ_1$ поместить матовое стекло, то образующийся на нём спектр можно наблюдать глазом, увеличив изображение с помощью линзы. В этом случае прибор называется *спектроскопом*. Внешне спектрограф и спектроскоп выглядят одинаково (рис. 151, *б*).

На рисунке 152 показан однотрубный спектроскоп (внешний вид — рис. *а*; устройство — рис. *б* и *в*). В школе его обычно используют при выполнении лабораторных работ по оптике. В том, как он действует, вы разберётесь самостоятельно при выполнении задания 3 из упражнения 45.

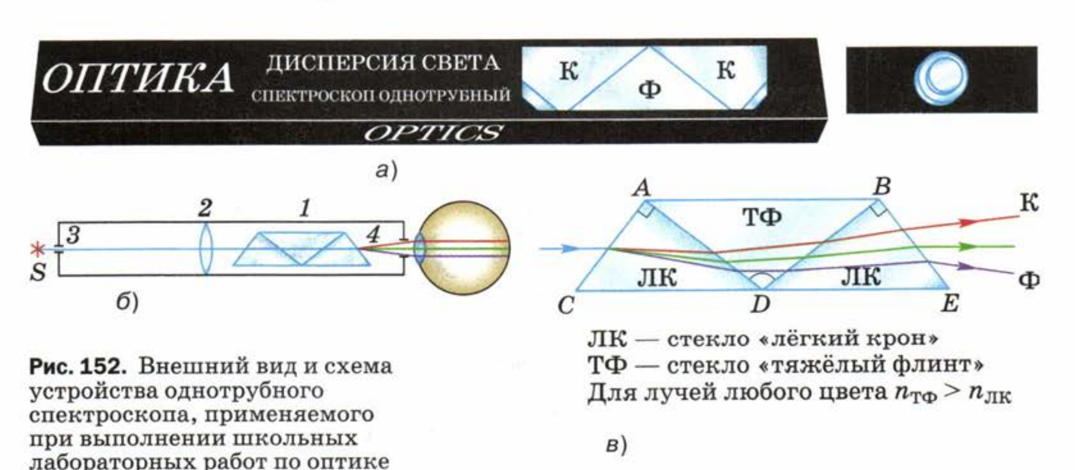


Рис. 152. Внешний вид и схема устройства однотрубного спектроскопа, применяемого при выполнении школьных лабораторных работ по оптике

Спектроскоп был сконструирован в 1815 г. немецким физиком ***Йозефом Фраунгофером.*** Этот прибор был необходим учёному для исследования явления дисперсии, которым он занимался в то время.

? Вопросы

1. Что называется дисперсией света? **2.** Расскажите об опыте по преломлению белого света в призме. (Ход опыта, результаты, вывод.) **3.** Расскажите об опыте, изображённом на рисунке 152. **4.** В чём заключается физическая причина различия цветов окружающих нас тел? **5.** Используя рисунок 151, расскажите об устройстве спектрографа. **6.** Что такое спектрограмма? **7.** Чем спектрограф отличается от спектроскопа?

УПРАЖНЕНИЕ 45

1. На столе в тёмной комнате лежат два листа бумаги — белый и чёрный. В центре каждого листа наклеен оранжевый круг. Что вы увидите, осветив эти листы белым светом; оранжевым светом такого же оттенка, как и круг?
2. Напишите на белом листе бумаги первые буквы названий всех цветов спектра фломастерами соответствующих цветов: К — красным, О — оранжевым, Ж — жёлтым и т. д. Рассмотрите буквы через трёхсантиметровый слой ярко окрашенной прозрачной жидкости, налитой в тонкостенный стакан. Запишите результаты наблюдений и объясните их.

   Указание: в качестве указанной жидкости можно использовать, например, малиновый или лимонный сироп, различные соки и т. п.
3. Рассмотрите рисунок 152, *в* и объясните, почему при входе в призму ADB лучи отклоняются в сторону более широкой её части (угол преломления меньше угла падения), а при входе в призму DBE — в сторону более узкой её части (угол преломления больше угла падения).

§ 50 ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

В опыте, изображённом на рисунке 149, при пропускании солнечного света через призму получался спектр в виде сплошной полосы. В ней были представлены все цвета (т. е. волны всех частот от $4{,}0 \cdot 10^{14}$ до $8{,}0 \cdot 10^{14}$ Гц), плавно переходящие один в другой. Такой спектр называется ***сплошным*** или ***непрерывным*** (см. рис. 150, *а*).

Сплошной спектр характерен для твёрдых и жидких излучающих тел, имеющих температуру порядка нескольких тысяч градусов Цельсия. Сплошной спектр дают также светящиеся газы и пары́, если они находятся под очень высоким давлением (т. е. если силы взаимодействия между их молекулами достаточно велики).

Например, сплошной спектр можно увидеть, если направить спектроскоп на свет от раскалённой нити электрической лампы ($t_{нити} \approx 2300$ °С), светящуюся поверхность расплавленного металла, пламя свечи. В этом случае свет излучается мельчайшими раскалёнными твёрдыми частицами (каждая из которых состоит из огромного числа взаимодействующих между собой атомов).

Иной вид имеет спектр, если в качестве источника света использовать светящиеся газы малой плотности. Такие газы обычно состоят из ***изолированных*** атомов, т. е. атомов, взаимодействие между которыми пренебрежимо мало. Свечения газа можно добиться, нагрев его до температуры порядка 2000 °С или более высокой.

Например, если внести в пламя спиртовки кусочек поваренной соли (рис. 153), то пламя окрасится в жёлтый цвет, а в спектре, наблюдаемом с помощью спектроскопа, будут видны две близко расположенные жёлтые линии, характерные для спектра паров натрия (рис. 154, *а*).



Рис. 153. При внесении в пламя газовой горелки кусочка поваренной соли пламя окрасится в жёлтый цвет

Это означает, что под действием высокой температуры молекулы NaCl распались на атомы натрия и хлора. Свечение атомов хлора возбудить гораздо труднее, чем атомов натрия, поэтому в данном опыте линии хлора не видны. Другие химические элементы дают другие наборы отдельных линий определённых длин волн (рис. 154, *б* и *в*).

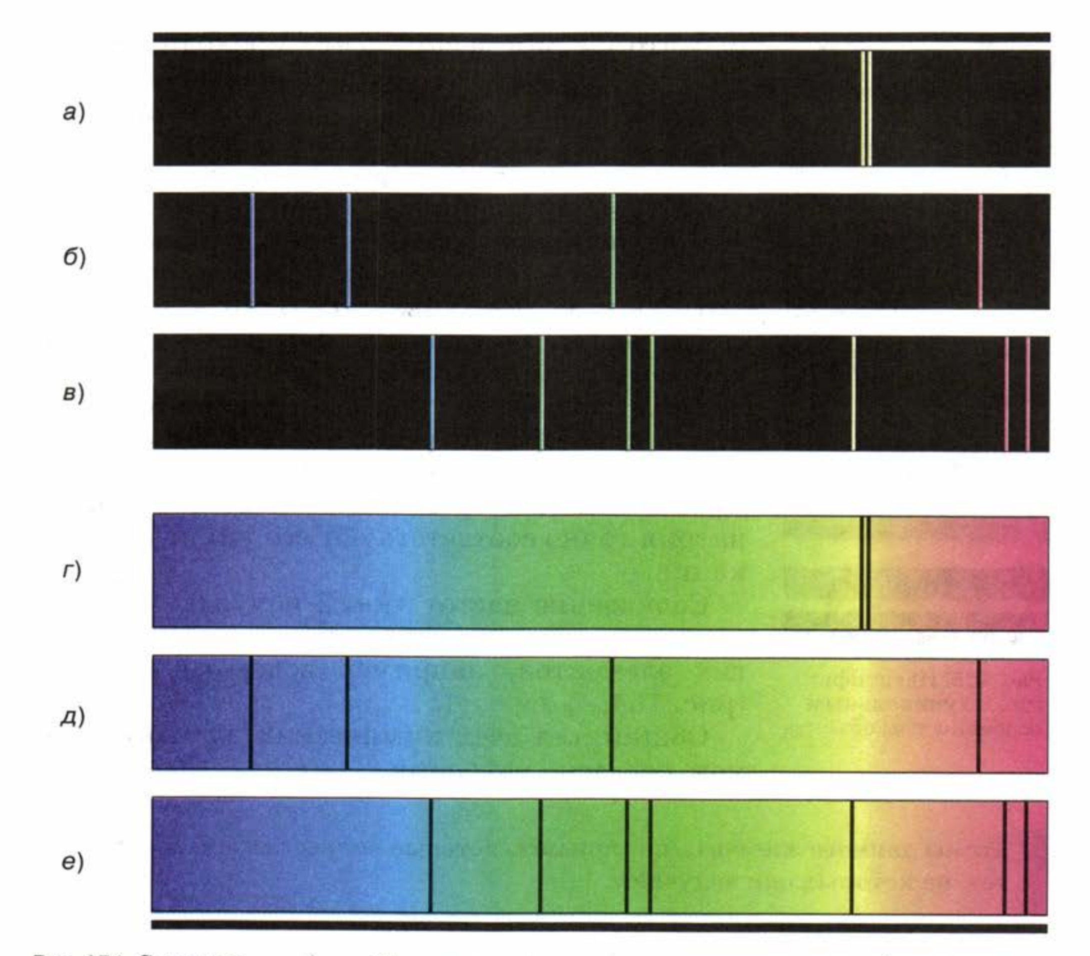


Рис. 154. Спектры испускания:
а — натрия;
б — водорода;
в — гелия.
Спектры поглощения:
г — натрия;
д — водорода;
е — гелия

Такие спектры называются ***линейчатыми.*** Линейчатые спектры получают от газов и паров малой плотности, при которой свет излучается изолированными атомами.

Описанные выше спектры — сплошные и линейчатые — называются ***спектрами испускания.***

Кроме спектров испускания существуют так называемые ***спектры поглощения.*** Из всех спектров поглощения будем рассматривать только линейчатые.

Линейчатые спектры поглощения дают газы малой плотности, состоящие из изолирован-

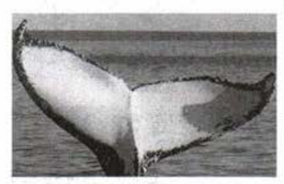
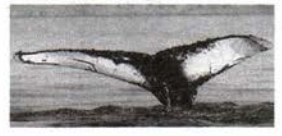





Рис. 155. Идентификация по уникальным особенностям объекта

ных атомов, когда сквозь них проходит свет от яркого и более горячего (по сравнению с температурой самих газов) источника, дающего непрерывный спектр.

Линейчатый спектр поглощения можно получить, например, если пропустить свет от лампы накаливания через сосуд с пара́ми натрия, температура которых ниже температуры нити лампы накаливания. В этом случае в сплошном спектре света от лампы появится узкая чёрная линия как раз в том месте, где располагается жёлтая линия в спектре испускания натрия (сравните рисунки 154, *а* и *г*). Это и будет линейчатый спектр поглощения натрия. Другими словами, линии поглощения атомов натрия точно соответствуют его линиям испускания.

Совпадение частот линий испускания и поглощения можно наблюдать и в спектрах других элементов, например водорода и гелия (рис. 154, *б*, *д* и *в*, *е*).

Общий для всех химических элементов закон, согласно которому

атомы данного элемента поглощают световые волны тех же самых частот, на которых они излучают,

был открыт в середине XIX в. немецким физиком ***Густавом Кирхгофом***.

Спектр атомов каждого химического элемента уникален. Как не бывает двух людей с одинаковым дактилоскопическим узором[1] или двух китов с одинаковой окраской хвостового плавника, так и не существует двух химических элементов, атомы которых излучали бы одинаковый набор спектральных линий (рис. 155).

[1] Расположение рельефных линий кожи на внутренних (ладонных) поверхностях ногтевых фаланг пальцев рук.

Благодаря этому стало возможным появление *метода спектрального анализа*, разработанного в 1859 г. Кирхгофом и его соотечественником, немецким химиком Р. Бунзеном.

Спектральным анализом называется метод определения химического состава вещества по его линейчатому спектру.

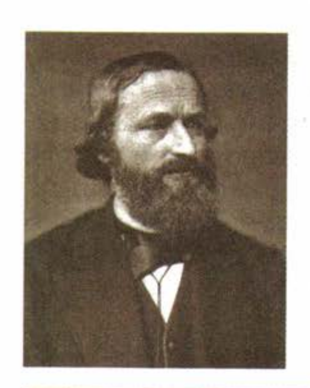
Для проведения спектрального анализа исследуемое вещество приводят в состояние атомарного газа (атомизируют) и одновременно с этим возбуждают атомы, т. е. сообщают им дополнительную энергию.

Для атомизации и возбуждения используют высокотемпературные источники света: пламя или электрические разряды. В них помещают образец исследуемого вещества в виде порошка или аэрозоля раствора (т. е. мельчайших капелек раствора, распылённого в воздухе). Затем с помощью спектрографа получают фотографию спектров атомов элементов, входящих в состав данного вещества.

В настоящее время существуют таблицы спектров всех химических элементов. Отыскав в таблице точно такие же спектры, какие были получены при анализе исследуемого образца, узнаю́т, какие химические элементы входят в его состав. Путём сравнения интенсивности линий определяют количество каждого элемента в образце.

Спектральный анализ отличается от химического анализа своей простотой, высокой чувствительностью (например, с его помощью можно обнаружить наличие химического элемента, масса которого в данном образце не превышает 10^{-10} г), а также возможностью определять химический состав отдалённых тел, например звёзд.

Он используется для контроля состава вещества в металлургии, маши-



ГУСТАВ КИРХГОФ

(1824—1887)

Немецкий физик. Разработал метод спектрального анализа и открыл элементы — цезий и рубидий, установил закон теплового излучения

ностроении и атомной индустрии. Этот метод применяется также в геологии, археологии, криминалистике и многих других сферах деятельности. В астрономии методом спектрального анализа определяют химический состав атмосфер планет и звёзд, температуру звёзд и магнитную индукцию их полей. По смещению спектральных линий в спектрах галактик была определена их скорость, и на основании этого сделан вывод о расширении нашей Вселенной.

? Вопросы

1. Как выглядит сплошной спектр? Какие тела дают сплошной спектр? Приведите примеры. **2.** Как выглядят линейчатые спектры? От каких источников света получаются линейчатые спектры? **3.** Каким образом можно получить линейчатый спектр испускания натрия? **4.** Опишите механизм получения линейчатых спектров поглощения. **5.** В чём заключается суть закона Кирхгофа, касающегося линейчатых спектров испускания и поглощения? **6*.** Что такое спектральный анализ и как он проводится? **7*.** Расскажите о применении спектрального анализа.

§ 51 ПОГЛОЩЕНИЕ И ИСПУСКАНИЕ СВЕТА АТОМАМИ. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ



НИЛЬС БОР

(1885—1962)

Датский физик-теоретик, общественный деятель, один из создателей современной физики. Создал теорию водородоподобного атома, основанную на двух постулатах

В процессе изучения и применения линейчатых спектров возникли различные вопросы. Как, например, объяснить, почему атомы каждого химического элемента имеют свой строго индивидуальный набор спектральных линий? Почему совпадают линии излучения и поглощения в спектре данного элемента? Чем обусловлены различия в спектрах атомов разных элементов?

Ответы на эти и многие другие вопросы удалось найти только в начале XX в. благодаря возникновению новой физической теории — *квантовой механики*. Одним из основоположников этой теории был датский физик ***Нильс Бор***.

Бор пришёл к заключению, что свет излучается атомами вещества.

В связи с этим в 1913 г. он сформулировал два постулата.

1. Атом может находиться только в особых, стационарных состояниях. Каждому состоянию соответствует определённое значение энергии — энергетический уровень. Находясь в стационарном состоянии, атом не излучает и не поглощает.

Стационарным состояниям соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Номера стационарных орбит и энергетических уровней (начиная с первого) в общем случае обозначаются латинскими буквами: n, k и т. д. Радиусы орбит, как и энергии стационарных состояний, могут принимать не любые, а определённые дискретные значения. Первая орбита расположена ближе всех к ядру.

2. Излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n.

$h\nu = E_k - E_n$

Согласно закону сохранения энергии, энергия излучённого фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu = E_k - E_n.$$

$\nu = \frac{E_k - E_n}{h}$

Из этого уравнения следует, что атом может излучать свет только с частотами

$$\nu = \frac{E_k - E_n}{h}.$$

Атом может также поглощать фотоны. При поглощении фотона атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

Состояние атома, в котором все электроны находятся на стационарных орбитах с наименьшей возможной энергией, называется ***основным***. Все другие состояния атома называются ***возбуждёнными***.

У атомов каждого химического элемента имеется свой характерный набор энергетических уровней. Поэтому переходу с более высокого энергетического уровня на более низкий будут соответствовать характерные линии в спектре испускания, отличные от линий в спектре другого элемента.

Совпадение линий излучения и поглощения в спектрах атомов данного химического элемента объясняется тем, что частоты волн, соответствующих этим линиям в спектре, определяются одними и теми же энергетическими уровнями. Поэтому атомы могут поглощать свет только тех частот, которые они способны излучать.



1. Сформулируйте постулаты Бора. **2.** Запишите уравнения для определения энергии и частоты излучённого фотона. **3.** Какое состояние атома называют основным; возбуждённым? **4.** Как объясняется совпадение линий в спектрах испускания и поглощения данного химического элемента?

ЗАДАНИЕ

- В вашем распоряжении имеются две стальные спицы. Придумайте эксперименты, с помощью которых можно было бы определить: а) намагничена ли одна из спиц, и если да, то какая; б) намагничены ли обе спицы.

Примечание: в эксперименте могут быть использованы только указанные предметы.

ИТОГИ ГЛАВЫ

САМОЕ ГЛАВНОЕ

Ниже даны физические понятия, явления, правило, закон, постулаты и их определения и формулировки. Последовательность изложения определений не соответствует последовательности понятий.

Перенесите в тетрадь названия понятий и законов и впишите в квадратные скобки порядковый номер определения (формулировки), соответствующего данному понятию, явлению, постулату, правилу, закону.

- **Переменный ток [ ];**
- **электромагнитная волна [ ];**
- **радиосвязь [ ];**
- **дисперсия света [ ];**
- **явление электромагнитной индукции [ ];**
- **правило Ленца [ ];**
- **явление самоиндукции [ ];**
- **закон преломления света [ ];**
- **квантовые постулаты Бора [ ];**
- **типы оптических спектров [ ].**

1. Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует изменению магнитного потока, которое вызвало этот ток.

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред, равная отношению скоростей света в этих средах: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$.

3. Возникновение индукционного тока в катушке при изменении силы тока в ней.

4. Атом может находиться только в особых, стационарных состояниях. Каждому состоянию соответствует определённое значение энергии — энергетический уровень. Находясь в стационарном состоянии, атом не излучает и не поглощает.

   Излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n.

5. Электрический ток, периодически меняющийся по модулю и направлению.

6. Система порождающих друг друга и распространяющихся в пространстве переменных электрического и магнитного полей.

7. При всяком изменении магнитного потока, пронизывающего площадь, ограниченную замкнутым проводником, в этом проводнике возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока.

8. Передача и приём информации посредством электромагнитных волн.

9. Зависимость показателя преломления вещества и скорости света в нём от частоты световой волны.

10. Сплошной (непрерывный) характерен для жидких и твёрдых излучающих тел с температурой порядка нескольких тысяч градусов и для светящихся газов и паров, находящихся под очень большим давлением; линейчатый характерен для светящихся газов малой плотности при температуре порядка 2000 °C.

ПРОВЕРЬ СЕБЯ

1. В данной системе отсчёта магнитное поле создаётся движущимися в ней

   А. фотонами
   Б. электронами
   В. атомами
   Г. нейтронами

2. Магнитное поле обнаруживается по его действию на

А. покоящиеся в нём протоны

Б. покоящиеся в нём нейтроны

В. покоящиеся в нём ионы

Г. проводник с протекающим по нему электрическим током

3. Магнитное поле характеризуется векторной физической величиной, которая обозначается символом $\vec{B}$ и называется

А. магнитной индуктивностью

Б. магнитной индукцией

В. электромагнитной индукцией

Г. самоиндукцией

4. Закону преломления света соответствует формула

А. $\dfrac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \dfrac{v_1}{v_2}$

Б. $n_{21} = \dfrac{v_1}{v_2}$

В. $n = \dfrac{c}{v}$

Г. $n_{21} = \dfrac{n_2}{n_1}$



Выполните задания, предложенные в электронном приложении.

Глава 4 СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ АТОМНЫХ ЯДЕР

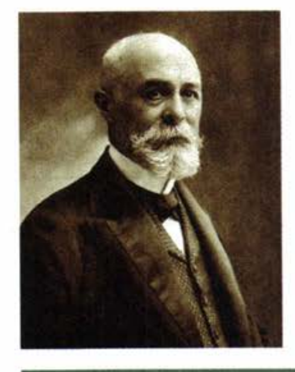
§ 52 РАДИОАКТИВНОСТЬ. МОДЕЛИ АТОМОВ

Предположение о том, что все тела состоят из мельчайших частиц, было высказано древнегреческими философами ***Левкиппом*** и ***Демокритом*** примерно 2500 лет назад. Частицы эти были названы *атомами*, что означает «неделимые». Атом — это мельчайшая, простейшая, не имеющая составных частей и поэтому неделимая частица.

Но примерно с середины XIX в. стали появляться экспериментальные факты, которые ставили под сомнение представления о неделимости атомов. Результаты этих экспериментов наводили на мысль о том, что атомы имеют сложную структуру и что в их состав входят электрически заряженные частицы.

Наиболее ярким свидетельством сложного строения атома явилось открытие явления радиоактивности, сделанное французским физиком ***Анри Беккерелем*** в 1896 г.

Беккерель обнаружил, что химический элемент уран самопроизвольно (т. е. без внешних воздействий) излучает ранее неизвестные невидимые лучи, которые позже были названы *радиоактивным излучением*.



АНРИ БЕККЕРЕЛЬ

(1852—1908)

Французский физик. Один из первооткрывателей радиоактивности

Поскольку радиоактивное излучение обладало необычными свойствами, многие учёные занялись его исследованием. Оказалось, что не только уран, но и некоторые другие химические элементы (например, ра-



ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД

(1871—1935)

Английский физик. Обнаружил сложный состав радиоактивного излучения радия, предложил ядерную модель строения атома. Открыл протон

дий) тоже самопроизвольно испускают радиоактивные лучи. Способность атомов некоторых химических элементов к самопроизвольному излучению стали называть ***радиоактивностью*** (от лат. radio — излучаю и activus — действенный).

В 1899 г. в результате опыта, проведённого под руководством английского физика ***Эрнеста Резерфорда***, было обнаружено, что радиоактивное излучение радия неоднородно, т. е. имеет сложный состав. Рассмотрим, как проводился этот опыт.

На рисунке 156, *а* изображён толстостенный свинцовый сосуд с крупицей радия на дне. Пучок радиоактивного излучения радия выходит сквозь узкое отверстие и попадает на фотопластинку (излучение радия происходит во все стороны, но сквозь толстый слой свинца оно пройти не может). После проявления фотопластинки на ней обнаруживалось одно тёмное пятно — как раз в том месте, куда попадал пучок.

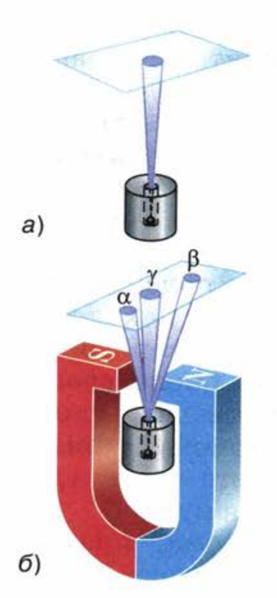


Рис. 156. Схема опыта Резерфорда по определению состава радиоактивного излучения

Потом опыт изменяли (рис. 156, *б*): создавали сильное магнитное поле, действовавшее на пучок. В этом случае на проявленной пластинке возникало три пятна: одно, центральное, было на том же месте, что и раньше, а два других — по разные стороны от центрального. Если два потока отклонились в магнитном поле от прежнего направления, значит, они представляют собой потоки заряженных частиц. Отклонение в разные стороны свидетельствовало о разных знаках электрических зарядов частиц. В одном потоке присутствовали только положительно заряженные частицы, в другом — отрицательно заряженные. А центральный поток представлял собой излучение, не имеющее электрического заряда.

Положительно заряженные частицы назвали ***альфа-частицами***, отрицательно заряженные — ***бета-частицами***, а нейтраль-

ные — ***гамма-частицами*** или гамма-квантами.

Некоторое время спустя в результате исследования различных физических характеристик и свойств этих частиц (электрического заряда, массы и др.) удалось установить, что *β-частица представляет собой электрон, а α-частица — полностью ионизированный атом химического элемента гелия* (т. е. атом гелия, потерявший оба электрона). Выяснилось также, что *γ-излучение представляет собой один из видов, точнее диапазонов, электромагнитного излучения* (см. рис. 136).

Явление радиоактивности, т. е. самопроизвольное излучение веществом α-, β- и γ-частиц, наряду с другими экспериментальными фактами, послужило основанием для предположения о том, что атомы вещества имеют сложный состав. Поскольку было известно, что атом в целом нейтрален, это явление позволило сделать предположение, что в состав атома входят отрицательно и положительно заряженные частицы.

Опираясь на эти и некоторые другие факты, английский физик ***Джозеф Джон Томсон*** предложил в 1903 г. одну из первых моделей строения атома. По предположению Томсона, атом представляет собой шар, по всему объёму которого равномерно распределён положительный заряд. Внутри этого шара находятся электроны. Каждый электрон может совершать колебательные движения около своего положения равновесия. Положительный заряд шара равен по модулю суммарному отрицательному заряду электронов, поэтому электрический заряд атома в целом равен нулю.



ДЖОЗЕФ ДЖОН ТОМСОН

(1856—1940)

Английский физик. Открыл электрон. Предложил одну из первых моделей строения атома

Модель строения атома, предложенная Томсоном, нуждалась в экспериментальной проверке. В частности, важно было проверить, действительно ли положительный заряд распределён по всему объёму атома с

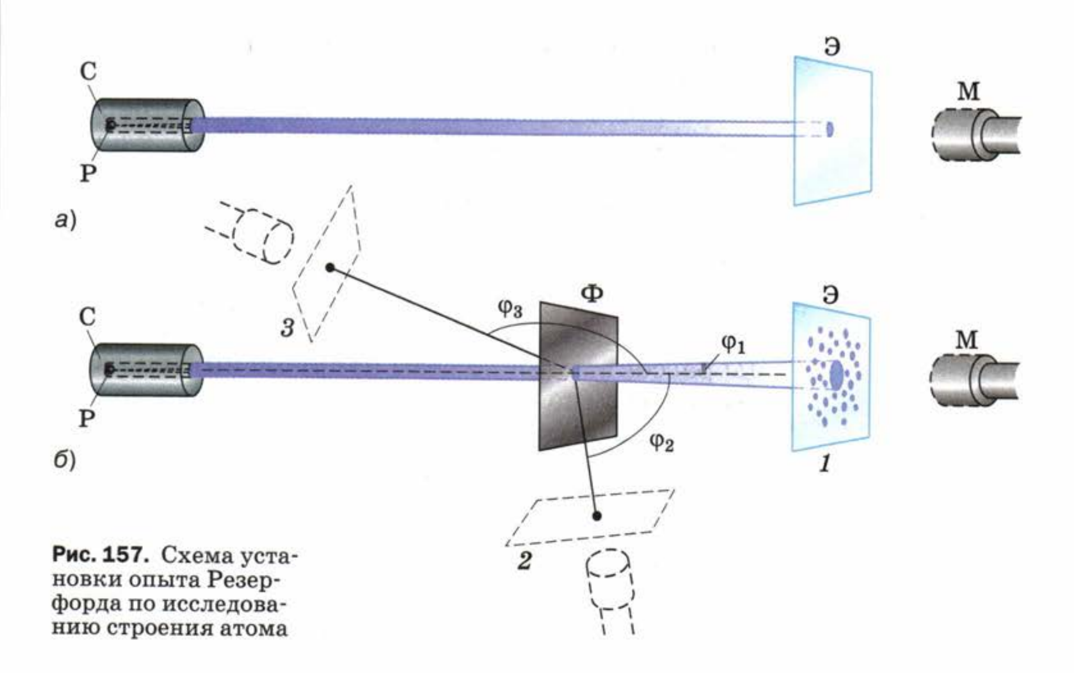


Рис. 157. Схема установки опыта Резерфорда по исследованию строения атома

постоянной плотностью. Поэтому в 1911 г. Резерфорд совместно со своими сотрудниками провёл ряд опытов по исследованию состава и строения атомов.

Чтобы понять, как проводились эти опыты, рассмотрим рисунок 157. В опытах использовался свинцовый сосуд С с радиоактивным веществом Р, излучающим α-частицы. Из этого сосуда α-частицы вылетают через узкий канал со скоростью порядка 15 000 км/с.

Поскольку α-частицы непосредственно увидеть невозможно, то для их обнаружения служит стеклянный экран Э. Экран покрыт тонким слоем специального вещества, благодаря чему в местах попадания в экран α-частиц возникают вспышки, которые наблюдаются с помощью микроскопа М. Такой метод регистрации частиц называется ***методом сцинтилляций*** (т. е. вспышек).

Вся эта установка помещается в сосуд, из которого откачан воздух (чтобы устранить рас-

сеяние α-частиц за счёт их столкновений с молекулами воздуха).

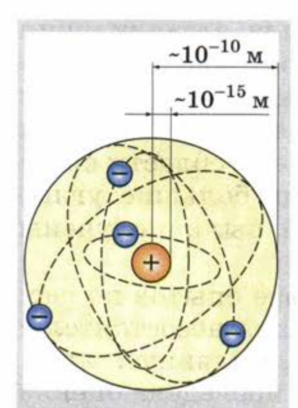
Если на пути α-частиц нет никаких препятствий, то они падают на экран узким, слегка расширяющимся пучком (рис. 157, *а*). При этом все возникающие на экране вспышки сливаются в одно небольшое световое пятно.

Если же на пути α-частиц поместить тонкую фольгу Ф из исследуемого металла (рис. 157, *б*), то при взаимодействии с веществом α-частицы рассеиваются по всем направлениям на разные углы φ (на рисунке изображены только три угла: φ_1, φ_2 и φ_3).

Когда экран находится в положении *1*, наибольшее количество вспышек расположено в центре экрана. Значит, основная часть всех α-частиц прошла сквозь фольгу, почти не изменив первоначального направления (рассеялась на малые углы). При удалении от центра экрана количество вспышек становится меньше. Следовательно, с увеличением угла рассеяния φ количество рассеянных на эти углы частиц резко уменьшается.

Перемещая экран вместе с микроскопом вокруг фольги, можно обнаружить, что некоторое (очень небольшое) число частиц рассеялось на углы, близкие к 90° (это положение экрана обозначено цифрой *2*), а некоторые единичные частицы — на углы порядка 180°, т. е. в результате взаимодействия с фольгой были отброшены назад (положение *3*).

Именно эти случаи рассеяния α-частиц на большие углы дали Резерфорду наиболее важную информацию для понимания того, как устроены атомы веществ. Проанализировав результаты опытов, Резерфорд пришёл к выводу, что **столь сильное отклонение α-частиц возможно только в том случае, если внутри атома имеется чрезвычайно сильное электрическое поле. Такое поле могло быть создано зарядом, сконцентрированным в очень малом объёме (по сравнению с объёмом атома).**



Один из примеров схематичного изображения ядерной модели атома, предложенной Э. Резерфордом

Поскольку масса электрона примерно в 8000 раз меньше массы α-частицы, электроны, входящие в состав атома, не могли существенным образом изменить направление движения α-частиц. Поэтому *в данном случае речь может идти только о силах электрического отталкивания между α-частицами и положительно заряженной частью атома,* масса которой значительно больше массы α-частицы.

Эти соображения привели Резерфорда к созданию ядерной (планетарной) модели атома (о которой вы уже имеете представление из курса физики 8 класса). Напомним, что, согласно этой модели, в центре атома находится положительно заряженное ядро, занимающее очень малый объём атома. Вокруг ядра движутся электроны, масса которых значительно меньше массы ядра. Атом электрически нейтрален, поскольку заряд ядра равен модулю суммарного заряда электронов.

Резерфорд сумел оценить размеры атомных ядер. Оказалось, что в зависимости от массы атома его ядро имеет диаметр порядка 10^{-14}—10^{-15} м, т. е. оно в десятки и даже сотни тысяч раз меньше атома (атом имеет диаметр около 10^{-10} м).

Рисунок 158 иллюстрирует процесс прохождения α-частиц сквозь атомы вещества с точки зрения ядерной модели. На этом рисунке показано, как меняется траектория полёта α-частиц в зависимости от того, на каком расстоянии от ядра они пролетают. Напряжённость создаваемого ядром электрического поля, а значит, и сила действия на α-частицу довольно быстро убывают с увеличением расстояния от ядра. Поэтому направление полёта частицы сильно меняется только в том случае, если она проходит очень близко к ядру.

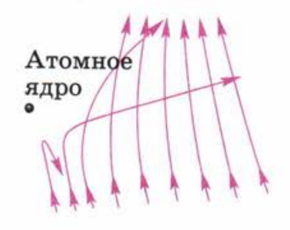


Рис. 158. Траектории полёта α-частиц при прохождении сквозь атомы вещества

Поскольку диаметр ядра значительно меньше диаметра атома, то большая часть из числа всех α-частиц проходит сквозь атом на таких

расстояниях от ядра, где сила отталкивания создаваемого им поля слишком мала, чтобы существенно изменить направление движения α-частиц. И только очень немногие частицы пролетают рядом с ядром, т. е. в области сильного поля, и отклоняются на большие углы. Именно такие результаты и были получены в опыте Резерфорда.

Таким образом, в результате опытов по рассеянию α-частиц была доказана несостоятельность модели атома Томсона, выдвинута ядерная модель строения атома и проведена оценка диаметров атомных ядер.

? Вопросы

1. В чём заключалось открытие, сделанное Беккерелем в 1896 г.? **2.** Расскажите, как проводился опыт, схема которого изображена на рисунке 156. Что выяснилось в результате этого опыта? **3.** О чём свидетельствовало явление радиоактивности? **4.** Что представлял собой атом согласно модели, предложенной Томсоном? **5.** Используя рисунок 157, расскажите, как проводился опыт по рассеянию α-частиц. **6.** Какой вывод был сделан Резерфордом на основании того, что некоторые α-частицы при взаимодействии с фольгой рассеялись на большие углы? **7.** Что представляет собой атом согласно ядерной модели, выдвинутой Резерфордом?

§ 53 РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР

В 1903 г. (т. е. ещё до обнаружения существования атомных ядер) Резерфорд и его сотрудник, английский химик ***Фредерик Содди***, обнаружили, что радиоактивный элемент радий в процессе α-распада (т. е. самопроизвольного излучения α-частиц) превращается в другой химический элемент — радон.

Радий и радон отличаются по своим физическим и химическим свойствам. Радий — металл, при обычных условиях он находится в твёрдом состоянии, а радон — инертный газ. Атомы этих химических элементов отличаются массой, зарядом ядра, числом электронов в электронной оболочке. Они по-разному вступают в химические реакции.

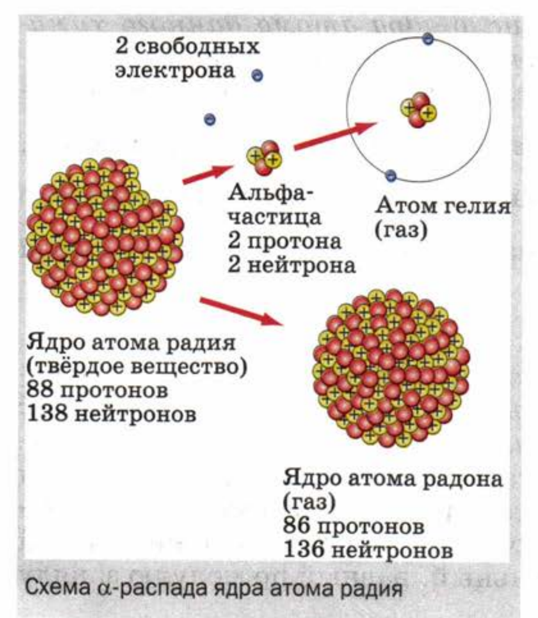


Схема α-распада ядра атома радия

Дальнейшие опыты с различными радиоактивными препаратами показали, что *не только при α-распаде, но и при β-распаде происходит превращение одного химического элемента в другой*.

После того как в 1911 г. Резерфордом была предложена ядерная модель атома, стало очевидным, что *именно ядро претерпевает изменения при радиоактивных превращениях*. Действительно, если бы изменения затрагивали только электронную оболочку атома (например, потеря одного или нескольких электронов), то при этом атом превращался бы в ион того же самого химического элемента, а вовсе не в атом другого элемента, с другими физическими и химическими свойствами.

Реакция α-распада ядра атома радия с превращением его в ядро атома радона записывается так:

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He},$$

где знаком $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ обозначено ядро атома радия, знаком $^{222}_{86}\mathrm{Rn}$ — ядро атома радона и знаком $^{4}_{2}\mathrm{He}$ — α-частица, или, что то же самое, ядро атома гелия (т. е. ядра атомов обозначаются так же, как и сами атомы в таблице Д. И. Менделеева).

Число, стоящее перед буквенным обозначением ядра сверху, называется ***массовым числом***, а снизу — ***зарядовым числом*** (или атомным номером).

Массовое число ядра атома данного химического элемента с точностью до целых чисел равно числу атомных единиц массы, содержащихся в массе этого ядра. (Напомним, что одна атомная единица массы (сокращённо 1 а. е. м.) равна $\frac{1}{12}$ части массы атома углерода $^{12}_{6}C$.)

Зарядовое число ядра атома данного химического элемента равно числу элементарных электрических зарядов, содержащихся в заряде этого ядра. (Напомним, что элементарным электрическим зарядом называется наименьший электрический заряд, положительный или отрицательный, равный по модулю заряду электрона.)

Можно сказать и так: *зарядовое число равно заряду ядра, выраженному в элементарных электрических зарядах.*

Оба эти числа — массовое и зарядовое — всегда целые и положительные. Они не имеют размерности (т. е. единиц измерения), поскольку указывают, во сколько раз масса и заряд ядра больше единичных.

По уравнению реакции можно увидеть, что ядро атома радия в результате излучения им α-частицы теряет приблизительно четыре атомные единицы массы и два элементарных заряда, превращаясь при этом в ядро атома радона.

Эта запись является следствием того, что в процессе радиоактивного распада выполняются *законы сохранения массового числа и заряда*: массовое число (226) и заряд (88) распадающегося ядра атома радия равны соответственно сумме массовых чисел ($222 + 4 = 226$) и сумме зарядов ($86 + 2 = 88$) ядер атомов радона и гелия, образовавшихся в результате этого распада.

Таким образом, из открытия, сделанного Резерфордом и Содди, следовало, что ***ядра атомов имеют сложный состав***, т. е. состоят из каких-то частиц. Кроме того, стало ясно, что *радиоактивность — это способность некоторых атомных ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием частиц.*

? Вопросы 1. Что происходит с радиоактивными химическими элементами в результате α- и β-распада? Приведите примеры. 2. Какая часть атома — ядро или электронная оболочка — претерпевает изменения при радиоактивном распаде? Почему вы так думаете? 3. Чему равно массовое число; зарядовое число? 4. На примере реакции α-распада радия объясните, в чём заключаются законы сохранения заряда (зарядового числа) и массового числа. 5. Какой вывод следовал из открытия, сделанного Резерфордом и Содди? 6. Что такое радиоактивность?

УПРАЖНЕНИЕ 46

1. Определите массу (в а. е. м. с точностью до целых чисел) и заряд (в элементарных зарядах) ядер атомов следующих химических элементов: углерода $^{12}_{6}C$; лития $^{6}_{3}Li$; кальция $^{40}_{20}Ca$.

2. Сколько электронов содержится в атомах каждого из химических элементов, перечисленных в предыдущей задаче?

3. Определите (с точностью до целых чисел), во сколько раз масса ядра атома лития $^{6}_{3}Li$ больше массы ядра атома водорода $^{1}_{1}H$.

4. Для ядра атома бериллия $^{9}_{4}Be$ определите: а) массу ядра в а. е. м. (с точностью до целых чисел); б) заряд ядра в элементарных электрических зарядах; в) число электронов в атоме.

5. Пользуясь законами сохранения массового числа и заряда, определите массовое число и заряд ядра химического элемента X, образующегося в результате следующей реакции β-распада:

$$^{14}_{6}C \rightarrow X + ^{0}_{-1}e,$$

где $^{0}_{-1}e$ — β-частица (электрон).

Найдите этот элемент в таблице Д. И. Менделеева на форзаце учебника. Как он называется?

§ 54 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТИЦ

Для дальнейшего развития ядерной физики (в частности, для исследования строения атомных ядер) необходимы были специальные устройства, с помощью которых можно было бы регистрировать ядра и различные частицы, а также изучать их взаимодействия.

Один из известных вам методов регистрации частиц — метод сцинтилляций — не даёт необходимой точности, так как результат подсчёта вспышек на экране в большой степени зависит от остроты зрения наблюдателя. Кроме того, длительное наблюдение оказывается невозможным, так как глаз быстро устаёт.

Более совершенным прибором для регистрации частиц является так называемый ***счётчик Гейгера***, изобретённый в 1908 г. немецким физиком ***Гансом Гейгером***.

Для рассмотрения устройства и принципа действия этого прибора обратимся к рисунку 159. Счётчик Гейгера состоит из металлического цилиндра, являющегося катодом (т. е. отрицательно заряженным электродом), и натянутой вдоль его оси тонкой проволочки — анода (т. е. положительного электрода). Катод и анод через сопротивление R присоединены к источнику высокого напряжения (порядка 200—1000 В), благодаря чему в пространстве между электродами возникает сильное электрическое поле. Оба электрода помещают в герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом (обычно аргоном).



Рис. 159. Схема устройства счётчика Гейгера

Пока газ не ионизирован, ток в электрической цепи источника напряжения отсутствует. Если же в трубку сквозь её стенки влетает какая-нибудь частица, способная ионизировать атомы газа, то в трубке образуется некоторое количество электрон-ионных пар. Электроны и ионы начинают двигаться к соответствующим электродам.

Если напряжённость электрического поля достаточно велика, то электроны на длине свободного пробега (т. е. между соударениями с молекулами газа) приобретают достаточно большую энергию и тоже ионизируют атомы газа, образуя новое поколение ионов и электронов, которые тоже могут принять участие в ионизации, и т. д. В трубке образуется так называемая электронно-ионная лавина, в результате чего происходит кратковременное и резкое возрастание силы тока в цепи и напряжения на сопротивлении R. Этот импульс напряжения, свидетельствующий о попадании в счётчик частицы, регистрируется специальным устройством.

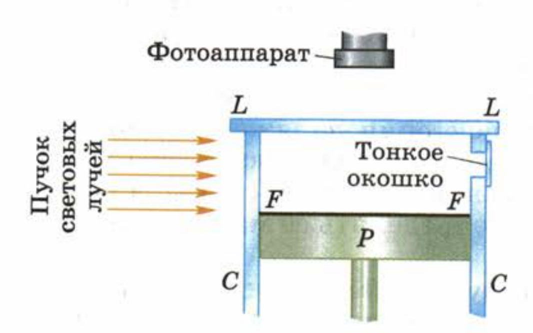
Поскольку сопротивление R очень велико (порядка 10^9 Ом), то в момент протекания тока основная доля напряжения источника падает именно на нём, в результате чего напряжение между катодом и анодом резко уменьшается и разряд автоматически прекращается (так как это напряжение становится недостаточным для образования новых поколений электронн-ионных пар). Прибор готов к регистрации следующей частицы.

Счётчик Гейгера применяется в основном для регистрации электронов, но существуют модели, пригодные и для регистрации γ-квантов.

Счётчик позволяет только регистрировать тот факт, что через него пролетает частица. Гораздо бóльшие возможности для изучения микромира даёт прибор, изобретённый шотландским физиком ***Чарлзом Вильсоном*** в 1912 г. и называемый ***камера Вильсона***.

Камера Вильсона (рис. 160) состоит из невысокого стеклянного цилиндра CC со стеклянной крышкой LL (на рисунке цилиндр показан в разрезе). Вну-

Рис. 160. Схема устройства камеры Вильсона



три цилиндра может двигаться поршень P. На дне камеры находится чёрная ткань FF. Благодаря тому что ткань увлажнена смесью воды с этиловым спиртом, воздух в камере насыщен пара́ми этих жидкостей.

При быстром движении поршня вниз находящиеся в камере воздух и пары́ жидкостей расширяются, их внутренняя энергия уменьшается, температура понижается.

В обычных условиях это вызвало бы конденсацию паров (появление тумана). Однако в камере Вильсона этого не происходит, так как из неё предварительно удаляются так называемые ***ядра конденсации*** (пылинки, ионы и пр.). Поэтому в данном случае при понижении температуры в камере пары́ жидкостей становятся *пересыщенными*, т. е. переходят в крайне неустойчивое состояние, при котором они будут легко конденсироваться на любых образующихся в камере ядрах конденсации, например на ионах.

Изучаемые частицы впускаются в камеру через тонкое окошко (иногда источник частиц помещают внутри камеры). Пролетая с большой скоростью через газ, частицы создают на своём пути ионы. Эти ионы и становятся ядрами конденсации, на которых пары́ жидкостей конденсируются в виде маленьких капелек (водяной пар конденсируется преимущественно на отрицательных ионах, пары́ этилового спирта — на положительных). Вдоль всего пути частицы возникает тонкий след из капелек (*трек*), благодаря чему её траектория движения становится видимой.

Если поместить камеру Вильсона в магнитное поле, то траектории заряженных частиц искривляются. По направлению изгиба следа можно судить о знаке заряда частицы, а по радиусу кривизны определять её массу, энергию, заряд.

Треки существуют в камере недолго, так как воздух нагревается, получая тепло от стенок

камеры, и капельки испаряются. Чтобы получить новые следы, необходимо удалить имеющиеся ионы с помощью электрического поля, сжать воздух поршнем, выждать, пока воздух в камере, нагревшийся при сжатии, охладится, и произвести новое расширение.

Обычно треки частиц в камере Вильсона не только наблюдают, но и фотографируют. При этом камеру освещают сбоку мощным пучком световых лучей, как показано на рисунке 160.

С помощью камеры Вильсона был сделан ряд важнейших открытий в области ядерной физики и физики элементарных частиц.

Одной из разновидностей камеры Вильсона является изобретённая в 1952 г. ***пузырьковая камера.*** Она действует примерно по тому же принципу, что и камера Вильсона, но вместо пересыщенного пара в ней используется перегретая выше точки кипения жидкость (например, жидкий водород). При движении в этой жидкости заряженной частицы вдоль её траектории образуется ряд пузырьков пара. Пузырьковая камера обладает бо́льшим быстродействием по сравнению с камерой Вильсона.

? Вопросы

1. По рисунку 159 расскажите об устройстве и принципе действия счётчика Гейгера. **2.** Для регистрации каких частиц применяется счётчик Гейгера? **3.** По рисунку 160 расскажите об устройстве и принципе действия камеры Вильсона. **4.** Какие характеристики частиц можно определить с помощью камеры Вильсона, помещённой в магнитное поле? **5.** В чём преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона? Чем отличаются эти приборы?

§ 55 ОТКРЫТИЕ ПРОТОНА И НЕЙТРОНА

Когда выяснилось, что ядра атомов имеют сложное строение, встал вопрос о том, из каких именно частиц они состоят.

В 1913 г. Резерфорд выдвинул гипотезу о том, что одной из частиц, входящих в состав атомных ядер всех химических элементов, является ядро атома водорода.

Основанием для такого предположения послужил ряд появившихся к тому времени фактов, полученных опытным путём. В частности, было известно, что массы атомов химических элементов превышают массу атома водорода в целое число раз (т. е. кратны ей).

В 1919 г. Резерфорд поставил опыт по исследованию взаимодействия α-частиц с ядрами атомов азота.

В этом опыте α-частица, летящая с огромной скоростью, при попадании в ядро атома азота выбивала из него какую-то частицу. По предположению Резерфорда, этой частицей было ядро атома водорода, которое Резерфорд назвал ***протоном*** (от греч. prótos — первый). Но поскольку наблюдение этих частиц велось методом сцинтилляций, то нельзя было точно определить, какая именно частица вылетала из ядра атома азота.

Удостовериться в том, что из ядра атома действительно вылетал протон, удалось только несколько лет спустя, когда реакция взаимодействия α-частицы с ядром атома азота была проведена в камере Вильсона.

Через прозрачное круглое окошко камеры Вильсона даже невооружённым глазом можно увидеть треки (т. е. траектории) частиц, быстро движущихся в ней (рис. 161).

На рисунке видны расходящиеся веером прямые. Это следы α-частиц, которые пролетели сквозь пространство камеры, не испытав соударений с ядрами атомов азота. Но след одной α-частицы раздваивается, образуя так называемую «вилку». Это означает, что в точке раздвоения трека произошло взаимодействие α-частицы с ядром атома азота, в результате чего образовались ядра атомов кислорода и водорода. То, что образуются именно эти ядра, было выяснено по характеру искривления треков при помещении камеры Вильсона в магнитное поле.

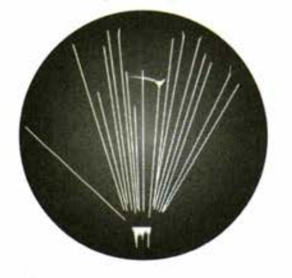


Рис. 161. Фотография треков заряженных частиц, полученных в камере Вильсона

Реакцию взаимодействия ядра азота с α-частицами с образованием ядер кислорода и водорода записывают так:

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H},$$

где символом $^{1}_{1}\mathrm{H}$ обозначен протон, т. е. ядро атома водорода, с массой, приблизительно равной 1 а. е. м. (точнее, 1,0072765 а. е. м.), и положительным зарядом, равным элементарному (т. е. модулю заряда электрона). Для обозначения протона используют также символ $^{1}_{1}p$.

В дальнейшем было исследовано взаимодействие α-частиц с ядрами атомов других элементов: бора (B), натрия (Na), алюминия (Al), магния (Mg) и многих других. В результате выяснилось, что из всех этих ядер α-частицы выбивали протоны. Это давало основания полагать, *что протоны входят в состав ядер атомов всех химических элементов*.

Открытие протона не давало полного ответа на вопрос о том, из каких частиц состоят ядра атомов. Если считать, что атомные ядра состоят только из протонов, то возникает противоречие.

Покажем на примере ядра атома бериллия ($^{9}_{4}\mathrm{Be}$), в чём заключается это противоречие.

Допустим, что ядро $^{9}_{4}\mathrm{Be}$ состоит только из протонов. Поскольку заряд каждого протона равен одному элементарному заряду, то число протонов в ядре должно быть равно зарядовому числу, в данном случае четырём.

Но если бы ядро бериллия действительно состояло только из четырёх протонов, то его масса была бы приблизительно равна 4 а. е. м. (так как масса каждого протона приблизительно равна 1 а. е. м.).



ДЖЕЙМС ЧЕДВИК

(1891—1974)

Английский физик-экспериментатор. Работы в области радиоактивности и ядерной физики. Открыл нейтрон

Однако это противоречит опытным данным, согласно которым масса ядра атома бериллия приблизительно равна 9 а. е. м.

Таким образом, становится ясно, что в ядра атомов помимо протонов входят ещё какие-то частицы.

В связи с этим в 1920 г. Резерфордом было высказано предположение о существовании электрически нейтральной частицы с массой, приблизительно равной массе протона.

В начале 30-х гг. XX в. были обнаружены неизвестные ранее лучи, которые назвали *бериллиевым излучением*, так как они возникали при бомбардировке α-частицами бериллия.

В 1932 г. английский учёный ***Джеймс Чедвик*** (ученик Резерфорда) с помощью опытов, проведённых в камере Вильсона, доказал, что бериллиевое излучение представляет собой поток электрически нейтральных частиц, масса которых приблизительно равна массе протона. Отсутствие у исследуемых частиц электрического заряда следовало, в частности, из того, что они не отклонялись ни в электрическом, ни в магнитном поле. А массу частиц удалось оценить по их взаимодействию с другими частицами.

Эти частицы были названы ***нейтронами***. Нейтрон принято обозначать символом ${}^{1}_{0}n$. Точные измерения показали, что масса нейтрона равна 1,0086649 а. е. м., т. е. чуть больше массы протона. Во многих случаях массу нейтрона (как и массу протона) считают равной 1 а. е. м. Поэтому вверху перед символом нейтрона ставят единицу. Нуль внизу означает отсутствие электрического заряда.

? Вопросы

1. Какой вывод был сделан на основании фотографии треков частиц в камере Вильсона (см. рис. 161)? **2.** Как иначе называется и каким символом обозначается ядро атома водорода? Каковы его масса и за-

ряд? **3.** Какое предположение (относительно состава ядер) позволяли сделать результаты опытов по взаимодействию α-частиц с ядрами атомов различных элементов? **4.** К какому противоречию приводит предположение о том, что ядра атомов состоят только из протонов? Поясните это на примере. **5.** Как было доказано отсутствие у нейтронов электрического заряда? Как была оценена их масса? **6.** Как обозначается нейтрон, какова его масса по сравнению с массой протона?

УПРАЖНЕНИЕ 47

Рассмотрите запись ядерной реакции взаимодействия ядер азота и гелия, в результате чего образуются ядра кислорода и водорода. Сравните суммарный заряд взаимодействующих ядер с суммарным зарядом ядер, образованных в результате этого взаимодействия. Сделайте вывод о том, выполняется ли закон сохранения электрического заряда в данной реакции.

§ 56 СОСТАВ АТОМНОГО ЯДРА. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Открытие нейтрона дало толчок к пониманию того, как устроены ядра атомов.

В том же 1932 г., когда был открыт нейтрон, советский физик ***Дмитрий Дмитриевич Иваненко*** и немецкий физик ***Вернер Гейзенберг*** предложили ***протонно-нейтронную модель строения ядер***, справедливость которой была впоследствии подтверждена экспериментально.

Протоны и нейтроны называются ***нуклонами*** (от лат. nucleus — ядро). Используя этот термин, можно сказать, что атомные ядра состоят из нуклонов.

Общее число нуклонов в ядре называется массовым числом и обозначается буквой A.

Так, например, для азота $^{14}_{7}\mathrm{N}$ массовое число $A = 14$, для железа $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ $A = 56$, для урана $^{235}_{92}\mathrm{U}$ $A = 235$.

Понятно, что *массовое число A численно равно массе ядра m, выраженной в атомных единицах массы и округлённой до целых чисел* (поскольку масса каждого нуклона примерно равна 1 а. е. м.). Например, для азота $m \approx 14$ а. е. м., для железа $m \approx 56$ а. е. м. и т. д.

Число протонов в ядре называется зарядовым числом и обозначается буквой *Z*.

Например, для азота $^{14}_{7}N$ зарядовое число $Z = 7$, для железа $^{56}_{26}Fe$ $Z = 26$, для урана $^{235}_{92}U$ $Z = 92$ и т. д.

Заряд каждого протона равен элементарному электрическому заряду. Поэтому *зарядовое число Z численно равно заряду ядра, выраженному в элементарных электрических зарядах. Для каждого химического элемента зарядовое число равно атомному (порядковому) номеру в таблице Д. И. Менделеева.*

Ядро любого химического элемента в общем виде обозначается так: $^{A}_{Z}X$ (под X подразумевается символ химического элемента).

Число нейтронов в ядре обычно обозначают буквой N. Поскольку массовое число A представляет собой общее число протонов и нейтронов в ядре, то можно записать: $A = Z + N$.

На основе протонно-нейтронной модели строения атомных ядер было дано объяснение некоторым экспериментальным фактам, открытым в первые два десятилетия XX в.

Так, в ходе изучения свойств радиоактивных элементов было обнаружено, что у одного и того же химического элемента встречаются атомы с различными по массе ядрами.

Одинаковый заряд ядер свидетельствует о том, что они имеют один и тот же порядковый номер в таблице Д. И. Менделеева, т. е. занимают в таблице одну и ту же клетку, одно и то

же место. Отсюда и произошло название всех разновидностей одного химического элемента: ***изотопы*** (от греч. слов isos — одинаковый и topos — место).

Изотопы — это разновидности данного химического элемента, различающиеся по массе атомных ядер.

Благодаря созданию протонно-нейтронной модели ядра (т. е. примерно через два десятилетия после открытия изотопов), удалось объяснить, почему атомные ядра с одним и тем же зарядом обладают разными массами. Очевидно, ядра изотопов содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов.

Так, например, существует три изотопа водорода: ^1_1H (протий), ^2_1H (дейтерий) и ^3_1H (тритий). Ядро изотопа ^1_1H вообще не имеет нейтронов — оно представляет собой один протон. В состав ядра дейтерия (^2_1H) входят две частицы: протон и нейтрон. Ядро трития ^3_1H состоит из трёх частиц: одного протона и двух нейтронов.

Гипотеза о том, что атомные ядра состоят из *протонов* и *нейтронов*, подтверждалась многими экспериментальными фактами.

Но возникал вопрос: почему ядра не распадаются на отдельные нуклоны под действием сил электростатического отталкивания между положительно заряженными протонами?

Расчёты показывают, что нуклоны не могут удерживаться вместе за счёт сил притяжения гравитационной или магнитной природы, поскольку эти силы существенно меньше электростатических.

В поисках ответа на вопрос об устойчивости атомных ядер учёные предположили, что *между всеми нуклонами в ядрах* действуют ка-

кие-то особые силы притяжения, которые значительно превосходят электростатические силы отталкивания между протонами. Эти силы назвали ***ядерными***.

Гипотеза о существовании ядерных сил оказалась правильной. Выяснилось также, что ядерные силы являются короткодействующими: на расстоянии 10^{-15} м они примерно в 100 раз больше сил электростатического взаимодействия, но уже на расстоянии 10^{-14} м они оказываются ничтожно малыми. Другими словами, ядерные силы действуют на расстояниях, сравнимых с размерами самих ядер.

? Вопросы **1.** Как называются протоны и нейтроны вместе? **2.** Что называется массовым числом? Что можно сказать о числовом значении массы атома (в а. е. м.) и его массовом числе? **3.** Что можно сказать о зарядовом числе, заряде ядра (выраженном в элементарных электрических зарядах) и порядковом номере в таблице Д. И. Менделеева для любого химического элемента? **4.** Как связаны между собой массовое число, зарядовое число и число нейтронов в ядре? **5.** Как в рамках протонно-нейтронной модели ядра объяснить существование ядер с одинаковыми зарядами и различными массами? **6.** Какой вопрос возникал в связи с гипотезой о том, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов? Какое предположение пришлось сделать учёным для ответа на этот вопрос? **7.** Как называются силы притяжения между нуклонами в ядре и каковы их характерные особенности?

УПРАЖНЕНИЕ 48

1. Сколько нуклонов в ядре атома бериллия $^{9}_{4}Be$? Сколько в нём протонов; нейтронов?
2. Для атома калия $^{39}_{19}K$ определите: а) зарядовое число; б) число протонов; в) порядковый номер в таблице Д. И. Менделеева; г) число нуклонов; д) число нейтронов.
3. Определите с помощью таблицы Д. И. Менделеева, атом какого химического элемента имеет: а) 3 протона в ядре; б) 9 электронов.
4. При α-распаде исходное ядро, излучая α-частицу $^{4}_{2}He$, превращается в ядро атома другого химического элемента.

   Например,

   $^{226}_{88}Ra \rightarrow ^{222}_{86}Rn + ^{4}_{2}He$.

На сколько клеток и в какую сторону (к началу или к концу таблицы Д. И. Менделеева) смещён образовавшийся элемент по отношению к исходному?

Перепишите в тетрадь данное ниже *правило смещения для α-распада*, заполнив пропуски:

при α-распаде одного химического элемента образуется другой элемент, который расположен в таблице Д. И. Менделеева на ... клетки ближе к её ..., чем исходный.

5. При β-распаде исходного ядра один из входящих в это ядро нейтронов превращается в протон, электрон ${}_{-1}^{0}e$ и антинейтрино ${}_{0}^{0}\tilde{\nu}$ (частицу, легко проходящую сквозь земной шар и, возможно, не имеющую массы). Электрон и антинейтрино вылетают из ядра, а протон остаётся в ядре, увеличивая его заряд на единицу. Например,

$${}_{19}^{40}\mathrm{K} \to {}_{20}^{40}\mathrm{Ca} + {}_{-1}^{0}e + {}_{0}^{0}\tilde{\nu}.$$

Перепишите данное ниже *правило смещения для β-распада*, заполнив пропуски:

при β-распаде одного химического элемента образуется другой элемент, который расположен в таблице Д. И. Менделеева на ... клетку ближе к ... таблицы, чем исходный.

6. Как вы думаете, действуют ли между нуклонами в ядре силы гравитационного притяжения (т. е. силы всемирного тяготения)? Ответ обоснуйте.

§ 57 ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ. ДЕФЕКТ МАССЫ

Для того чтобы разбить ядро на отдельные, не взаимодействующие между собой (свободные) нуклоны, необходимо произвести работу по преодолению ядерных сил, т. е. сообщить ядру определённую энергию. Наоборот, при соединении свободных нуклонов в ядро выделяется такая же энергия (по закону сохранения энергии).

Минимальная энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны, называется энергией связи ядра.

Каким же образом можно определить величину энергии связи ядра?



АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

(1879—1955)

Немецкий физик-теоретик, один из создателей современной физики. Открыл закон взаимосвязи массы и энергии, создал специальную и общую теории относительности

Наиболее простой путь нахождения этой энергии основан на применении *закона о взаимосвязи массы и энергии*, открытого немецким учёным ***Альбертом Эйнштейном*** в 1905 г.

Согласно этому закону между массой m системы частиц и *энергией покоя*, т. е. внутренней энергией E_0 этой системы, существует прямая пропорциональная зависимость:

$$\boldsymbol{E_0 = mc^2},$$

где c — скорость света в вакууме.

Если энергия покоя системы частиц в результате каких-либо процессов изменится на величину ΔE_0[1], то это повлечёт за собой соответствующее изменение массы этой системы на величину Δm, причём связь между этими величинами выразится равенством:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2},$$

или

$$\Delta \boldsymbol{E_0} = \Delta \boldsymbol{mc^2}.$$

$\boldsymbol{E_0 = mc^2}$

Таким образом, при слиянии свободных нуклонов в ядро в результате выделения энергии (которая уносится излучаемыми при этом фотонами) должна уменьшиться и масса нуклонов. Другими словами, **масса ядра всегда меньше суммы масс нуклонов, из которых оно состоит.**

[1] Греческой буквой Δ («дельта») принято обозначать изменение той физической величины, перед символом которой эта буква ставится.

Недостаток массы ядра Δm по сравнению с суммарной массой составляющих его нуклонов можно записать так:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_я,$$

где $M_я$ — масса ядра, Z и N — число протонов и нейтронов в ядре, а m_p и m_n — массы свободных протона и нейтрона.

$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_я$

Величина Δm называется ***дефектом массы***. Наличие дефекта массы подтверждается многочисленными опытами.

Рассчитаем, например, энергию связи ΔE_0 ядра атома дейтерия ^2_1H (тяжёлого водорода), состоящего из одного протона и одного нейтрона. Другими словами, рассчитаем энергию, необходимую для расщепления ядра на протон и нейтрон.

Для этого определим сначала дефект массы Δm этого ядра, взяв приближённые значения масс нуклонов и массы ядра атома дейтерия из соответствующих таблиц. Согласно табличным данным, масса протона приблизительно равна 1,0073 а. е. м., масса нейтрона — 1,0087 а. е. м., масса ядра дейтерия — 2,0141 а. е. м. Значит, Δm = (1,0073 а. е. м. + 1,0087 а. е. м.) – – 2,0141 а. е. м. = 0,0019 а. е. м.

Чтобы энергию связи получить в джоулях, дефект массы нужно выразить в килограммах.

Учитывая, что 1 а. е. м. = $1{,}6605 \cdot 10^{-27}$ кг, получим:

$\Delta m = 1{,}6605 \cdot 10^{-27}$ кг $\cdot\, 0{,}0019 =$
$= 0{,}0032 \cdot 10^{-27}$ кг.

Подставив это значение дефекта массы в формулу энергии связи, получим:

$$\Delta E_0 = 0{,}0032 \cdot 10^{-27}\ \text{кг} \cdot \left(3 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 =$$

$$= 0{,}0288 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = 0{,}0288 \cdot 10^{-11}\ \text{Дж}.$$

Энергию, выделяющуюся или поглощающуюся в процессе любых ядерных реакций, можно рассчитать, если известны массы взаимодействующих и образующихся в результате этого взаимодействия ядер и частиц.

? Вопросы **1.** Что называется энергией связи ядра? **2.** Запишите формулу для определения дефекта массы любого ядра. **3.** Запишите формулу для расчёта энергии связи ядра.

§ 58 ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

Деление ядер урана при бомбардировке их нейтронами было открыто в 1939 г. немецкими учёными ***Отто Ганом*** и ***Фрицем Штрассманом***.

Рассмотрим механизм этого явления. На рисунке 162, *а* условно изображено ядро атома урана $^{235}_{92}\mathrm{U}$. Поглотив лишний нейтрон, ядро возбуждается и деформируется, приобретая вытянутую форму (рис. 162, *б*).

Вы уже знаете, что в ядре действует два вида сил: *электростатические силы отталкивания между протонами*, стремящиеся разорвать ядро, и *ядерные силы притяжения между всеми нуклонами*, благодаря которым ядро не распадается. Но ядерные силы — короткодействующие, поэтому в вытянутом ядре они уже не могут удержать сильно удалённые друг от друга части ядра. Под действием электростатических сил отталкивания ядро разрывается на две части (рис. 162, *в*), которые разлетаются в разные стороны с огромной скоростью и излучают при этом 2—3 нейтрона.

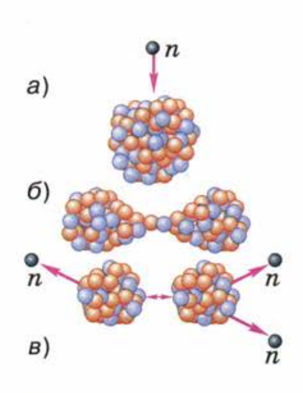


Рис. 162. Процесс деления ядра урана под воздействием попавшего в него нейтрона

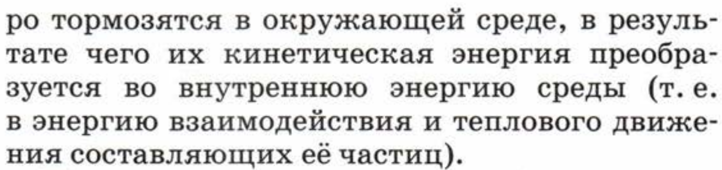
Получается, что часть внутренней энергии ядра переходит в кинетическую энергию разлетающихся осколков и частиц. Осколки быст-



ОТТО ГАН

(1879—1968)

Немецкий физик, учёный-новатор в области радиохимии. Открыл расщепление урана, ряд радиоактивных элементов



ро тормозятся в окружающей среде, в результате чего их кинетическая энергия преобразуется во внутреннюю энергию среды (т. е. в энергию взаимодействия и теплового движения составляющих её частиц).

При одновременном делении большого количества ядер урана внутренняя энергия окружающей уран среды и соответственно её температура заметно возрастают (т. е. среда нагревается).

Таким образом, *реакция деления ядер урана идёт с выделением энергии в окружающую среду.*

Энергия, заключённая в ядрах атомов, колоссальна. Например, при полном делении всех ядер, имеющихся в 1 г урана, выделилось бы столько же энергии, сколько выделяется при сгорании 2,5 т нефти.

Для преобразования внутренней энергии атомных ядер в электрическую на атомных электростанциях используют так называемые ***цепные реакции деления ядер.***

Рассмотрим механизм протекания цепной реакции деления ядра изотопа урана $^{235}_{92}U$. Ядро атома урана (рис. 163) в результате захвата нейтрона разделилось на две части, излучив при этом три нейтрона. Два из этих нейтронов вызвали реакцию деления ещё двух ядер, при этом образовалось уже четыре нейтрона. Эти, в свою очередь, вызвали деление четырёх ядер, после чего образовалось девять нейтронов и т. д.



ФРИЦ ШТРАССМАН

(1902—1980)

Немецкий физик и химик. Работы относятся к ядерной химии, ядерному делению. Дал химическое доказательство процессу деления

Цепная реакция возможна благодаря тому, что при делении каждого ядра образуется 2—3 нейтрона, которые могут принять участие в делении других ядер.

На рисунке 163 показана схема цепной реакции, при которой общее

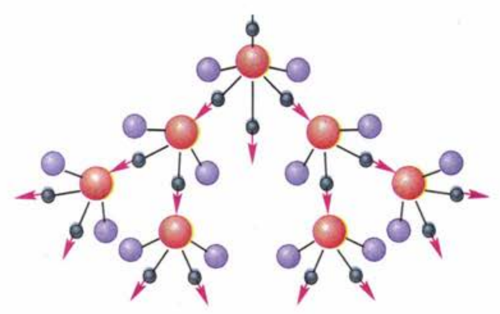


Рис. 163. Цепная реакция деления ядер урана $^{235}_{92}U$

число свободных нейтронов в куске урана *лавинообразно* увеличивается со временем. Соответственно резко возрастает число делений ядер и энергия, выделяющаяся в единицу времени. Поэтому такая реакция носит взрывной характер (она протекает в атомной бомбе).

Возможен другой вариант, при котором число свободных нейтронов уменьшается со временем. В этом случае цепная реакция прекращается. Следовательно, такую реакцию тоже нельзя использовать для производства электроэнергии.

В мирных целях возможно использовать энергию только такой цепной реакции, в которой число нейтронов не меняется с течением времени.

Как же добиться того, чтобы число нейтронов всё время оставалось постоянным? Для решения этой проблемы нужно знать, какие факторы влияют на увеличение и на уменьшение общего числа свободных нейтронов в куске урана, в котором протекает цепная реакция.

Одним из таких факторов является *масса урана*. Дело в том, что не каждый нейтрон, излучённый при делении ядра, вызывает деление других ядер (см. рис. 163). Если масса (и соответственно размеры) куска урана слишком мала, то многие нейтроны вылетят за его пределы, не успев встретить на своём пути ядро, вызвать его деление и породить таким образом новое поколение нейтронов, необходимых для продолжения реакции. В этом случае цепная реакция прекратится. Чтобы реакция не прекращалась, нужно увеличить массу урана до определённого значения, называемого ***критическим***.

Почему при увеличении массы цепная реакция становится возможной? Чем больше масса

куска, тем больше его размеры и тем длиннее путь, который проходят в нём нейтроны. При этом вероятность встречи нейтронов с ядрами возрастает. Соответственно увеличивается число делений ядер и число излучаемых нейтронов.

При критической массе урана число нейтронов, появившихся при делении ядер, становится равным числу потерянных нейтронов (т. е. захваченных ядрами без деления и вылетевших за пределы куска).

Поэтому их общее число остаётся неизменным. При этом цепная реакция может идти длительное время, не прекращаясь и не приобретая взрывного характера.

Наименьшая масса урана, при которой возможно протекание цепной реакции, называется критической массой.

Если масса урана больше критической, то в результате резкого увеличения числа свободных нейтронов цепная реакция приводит к взрыву, а если меньше критической, то реакция не протекает из-за недостатка свободных нейтронов.

Уменьшить потерю нейтронов (которые вылетают из урана, не прореагировав с ядрами) можно не только за счёт увеличения массы урана, но и с помощью специальной *отражающей оболочки*. Для этого кусок урана помещают в оболочку, сделанную из вещества, хорошо отражающего нейтроны (например, из бериллия). Отражаясь от этой оболочки, нейтроны возвращаются в уран и могут принять участие в делении ядер.

Существует ещё несколько факторов, от которых зависит возможность протекания цепной реакции. Например, если кусок урана содержит слишком много *примесей* других химических элементов, то они поглощают большую часть нейтронов и реакция прекращается.

Наличие в уране так называемого *замедлителя нейтронов* также влияет на ход реакции. Дело в том, что ядра урана-235 с наибольшей вероятностью делятся под действием медленных нейтронов. А при делении ядер образуются быстрые нейтроны. Если быстрые нейтроны замедлить, то большая их часть захватится ядрами урана-235 с последующим делением этих ядер. В качестве замедлителей используются такие вещества, как *графит*, *вода*, *тяжёлая вода* (в состав которой входит дейтерий — изотоп водорода с массовым числом 2), и некоторые другие. Эти вещества только замедляют нейтроны, почти не поглощая их.

Таким образом, возможность протекания цепной реакции определяется *массой урана, количеством примесей в нём, наличием оболочки* и *замедлителя* и некоторыми другими факторами.

Критическая масса шарообразного куска урана-235 приблизительно равна 50 кг. При этом его радиус составляет всего 9 см, поскольку уран имеет очень большую плотность.

Применяя замедлитель и отражающую оболочку и уменьшая количество примесей, удаётся снизить критическую массу урана до 0,8 кг.



1. Почему деление ядра может начаться только тогда, когда оно деформируется под действием поглощённого им нейтрона? **2.** Что образуется в результате деления ядра? **3.** В какую энергию переходит часть внутренней энергии ядра при его делении; кинетическая энергия осколков ядра урана при их торможении в окружающей среде? **4.** Как идёт реакция деления ядер урана — с выделением энергии в окружающую среду или, наоборот, с поглощением энергии? **5.** Расскажите о механизме протекания цепной реакции, используя рисунок 163. **6.** Что называется критической массой урана? **7.** Возможно ли протекание цепной реакции, если масса урана меньше критической; больше критической? Почему?

§ 59 ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ АТОМНЫХ ЯДЕР В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ

Ядерный реактор — это устройство, предназначенное для осуществления управляемой ядерной реакции.

Управление ядерной реакцией заключается в регулировании скорости размножения свободных нейтронов в уране, чтобы их число оставалось неизменным. При этом цепная реакция будет продолжаться столько времени, сколько это необходимо, не прекращаясь и не приобретая взрывного характера.

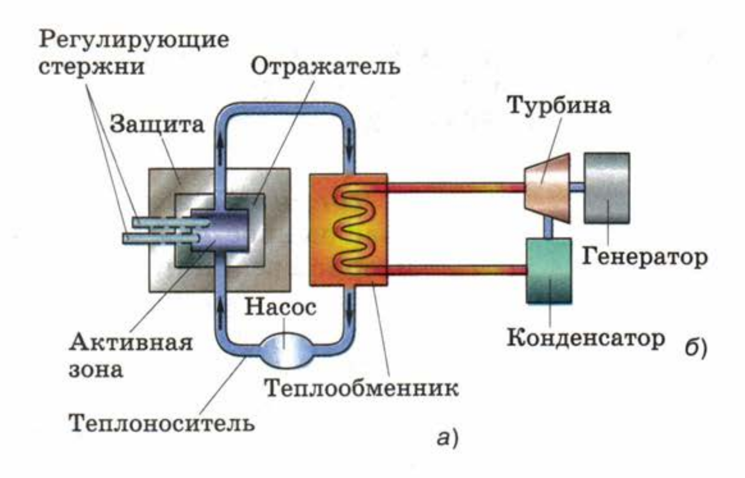
Рассмотрим устройство и принцип действия реактора, в котором в качестве делящегося вещества (его называют также *ядерным топливом* или *горючим*) используется в основном уран-235. В природном уране этого изотопа недостаточно для протекания цепной реакции (всего 0,7%), поэтому природный уран обогащают, т. е. увеличивают процентное содержание в нём урана-235 (до 5%).

Реактор, работающий на этом изотопе урана, называется ***реактором на медленных нейтронах***. Он назван так потому, что уран-235 наиболее эффективно делится под действием медленных нейтронов. Поскольку при делении ядер образуются в основном быстрые нейтроны, их необходимо замедлять. Для этого в реакторе с таким ядерным топливом используется замедлитель нейтронов.

На рисунке 164, *а* изображены основные части реактора на медленных нейтронах. В активной зоне находится *ядерное топливо* в виде урановых стержней (они на рисунке не показаны) и *замедлитель нейтронов* — в данном случае вода.

Масса каждого уранового стержня значительно меньше критической, поэтому в одном

Рис. 164. Схема устройства ядерного реактора на медленных нейтронах



стержне цепная реакция происходить не может (это делается специально из соображений безопасности). Она начинается после погружения в активную зону всех урановых стержней, т. е. когда масса урана достигнет критического значения.

Активная зона окружена слоем вещества, отражающего нейтроны (*отражатель*), и *защитной оболочкой* из бетона, задерживающей нейтроны и другие частицы.

Для управления реакцией служат *регулирующие стержни*, эффективно поглощающие нейтроны. При их полном погружении в активную зону цепная реакция идти не может. Для запуска реактора регулирующие стержни постепенно выводят из активной зоны до тех пор, пока не начнётся цепная реакция деления ядер урана.

Образующиеся в процессе этой реакции нейтроны и осколки ядер, разлетаясь с большой скоростью, попадают в воду, сталкиваются с ядрами атомов кислорода и водорода, отдают им часть своей кинетической энергии и замедляются. Вода при этом нагревается, а замедленные нейтроны через какое-то время опять

попадают в урановые стержни и участвуют в делении ядер.

Активная зона реактора посредством труб соединяется с *теплообменником*, образуя так называемый первый замкнутый контур. Насосы обеспечивают циркуляцию воды в этом контуре. При этом вода, нагретая в активной зоне за счёт внутренней энергии атомных ядер, проходя через теплообменник, нагревает воду в змеевике второго контура, превращая её в пар. Таким образом, *вода в активной зоне реактора служит не только замедлителем нейтронов, но и теплоносителем, отводящим тепло*.

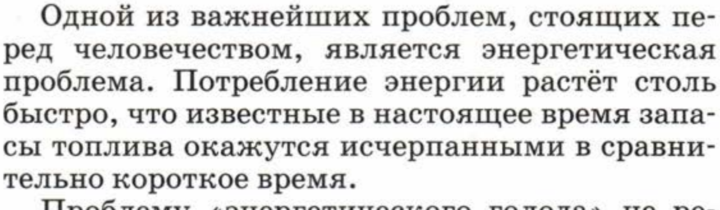
На рисунке 164, *б* схематично показаны устройства, в которых энергия пара, образовавшегося в змеевике, преобразуется в электрическую энергию. Посредством этого пара вращается турбина, которая, в свою очередь, приводит во вращение ротор генератора электрического тока. Отработанный пар поступает в конденсатор и превращается в воду. Затем весь цикл повторяется.

Таким образом, при получении электрического тока на атомных электростанциях происходят следующие преобразования энергии: часть внутренней энергии атомных ядер урана → кинетическая энергия нейтронов и осколков ядер → внутренняя энергия воды → внутренняя энергия пара → кинетическая энергия пара → кинетическая энергия ротора турбины и ротора генератора → электрическая энергия.

? Вопросы

1. Что такое ядерный реактор? Назовите основные части реактора. Что находится в его активной зоне? **2.** В чём заключается управление ядерной реакцией? **3.** Для чего нужны регулирующие стержни? Как ими пользуются? **4.** Какую вторую функцию (помимо замедления нейтронов) выполняет вода в первом контуре реактора? **5.** Какие процессы происходят во втором контуре реактора? **6.** Какие преобразования энергии происходят при получении электрического тока на атомных электростанциях?

§ 60 АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА



Одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством, является энергетическая проблема. Потребление энергии растёт столь быстро, что известные в настоящее время запасы топлива окажутся исчерпанными в сравнительно короткое время.



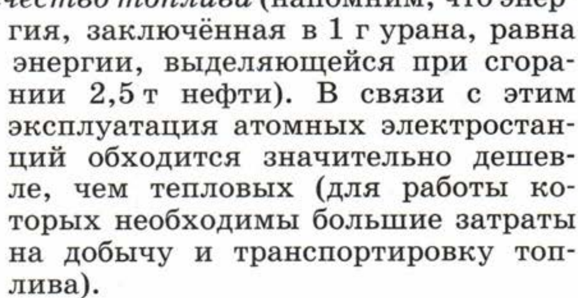
Обнинская АЭС

Проблему «энергетического голода» не решает и использование энергии так называемых возобновляемых источников (энергии рек, ветра, солнца, морских волн, глубинного тепла Земли), так как они могут обеспечить в лучшем случае только 5—10% наших потребностей. В связи с этим в середине XX в. возникла необходимость поиска новых источников энергии.

В настоящее время реальный вклад в энергоснабжение вносит ядерная энергетика. Первый европейский реактор был создан в 1946 г. в Советском Союзе под руководством ***Игоря Васильевича Курчатова***.

В 1954 г. в нашей стране (в г. Обнинске) была введена в действие первая в мире атомная электростанция (АЭС). Её мощность составляла всего 5000 кВт. Современные АЭС имеют в сотни раз бóльшую мощность.

АЭС имеют ряд преимуществ перед другими видами электростанций. Основное их преимущество заключается в том, что для работы АЭС требуется очень небольшое количество топлива (напомним, что энер-



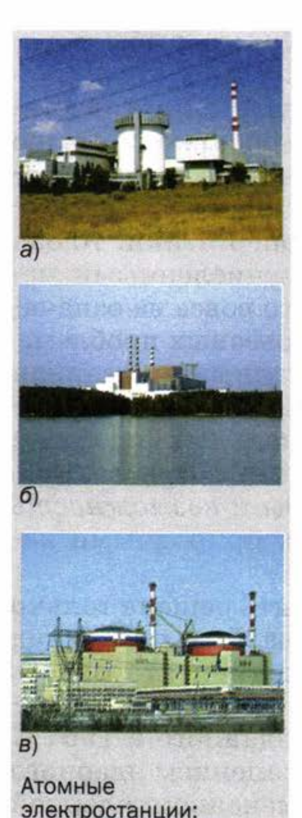
гия, заключённая в 1 г урана, равна энергии, выделяющейся при сгорании 2,5 т нефти). В связи с этим эксплуатация атомных электростанций обходится значительно дешевле, чем тепловых (для работы которых необходимы большие затраты на добычу и транспортировку топлива).



ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ КУРЧАТОВ

(1903—1960)

Российский физик, академик. Под его руководством в СССР проводились исследования в различных областях ядерной физики


а)

б)

в)

Атомные электростанции:
а — Нововоронежская;
б — Белоярская;
в — Ростовская

Правда, строительство тепловых станций (ТЭС) обходится дешевле, чем атомных. Поэтому на сегодняшний день стоимость тепловых и атомных станций сопоставима.

Второе преимущество АЭС (при правильной их эксплуатации) заключается в их экологической чистоте по сравнению с ТЭС. Конечно, в выбросах АЭС содержатся радиоактивные газы и частицы. Но большая часть радиоактивных ядер (так называемых радионуклидов), содержащихся в выбросах АЭС, довольно быстро распадается, превращаясь в нерадиоактивные. А количество долгоживущих радионуклидов и мощность их излучения сравнительно невелики.

Что же касается электростанций, работающих на угле, то именно они являются одним из основных источников поступления в среду обитания человека долгоживущих радионуклидов. Дело в том, что в угле всегда содержатся микропримеси радиоактивных элементов, которые выносятся с продуктами сгорания, осаждаясь на прилегающей местности и накапливаясь на зольных полях возле ТЭС.

Кроме того, используемое на ТЭС природное органическое топливо (уголь, нефть, газ) содержит от 1,5 до 4,5% серы. Образующийся при сгорании топлива сернистый ангидрид, даже пройдя через фильтры и системы очистки, частично выбрасывается в атмосферу. Вступая в контакт с атмосферной влагой, он образует раствор серной кислоты и вместе с дождями выпадает на землю. Такие кислотные дожди наносят огромный ущерб растительности, разрушают структуру почвы и значительно меняют её состав (для восстановления которого необходима не одна сотня лет).

Неблагоприятные экологические последствия связаны и с использованием энергии рек. Эти последствия заключаются в отчуждении больших площадей земли (в связи со строительством водохранилищ и образованием

вследствие этого болот), гибелью рыбы в результате перекрытия рек и т. д.

Для строительства электростанций достаточной мощности, преобразующих энергию солнца и ветра, тоже требуются, как оказалось, огромные территории.

Что же касается ядерной энергетики, то она не сопровождается вышеперечисленными негативными явлениями. Но это вовсе не означает, что АЭС не порождают серьёзных проблем.

В настоящее время квалифицированная критика ядерной энергетики концентрируется вокруг трёх принципиальных проблем: *содействие распространению ядерного оружия, радиоактивные отходы* и *возможность аварий*, особенно вызванных природными катаклизмами.

Первая проблема может быть решена только в рамках мирового сообщества. Большой вклад в её решение вносит, в частности, деятельность Международного агентства по атомной энергии при ООН (МАГАТЭ), созданного в 1957 г. для контроля за нераспространением ядерного оружия и безопасным применением ядерной энергии в мирных целях.

Обезвреживание радиоактивных отходов сводится в основном к трём задачам: 1) к совершенствованию технологий с целью уменьшения образования отходов при работе реакторов; 2) к переработке отходов для их консолидации (т. е. скрепления, связывания) и уменьшения опасности от распространения в окружающей среде; 3) к надёжной изоляции отходов от биосферы и человека за счёт создания могильников разных типов.

Для выполнения поставленных задач в проектах всех АЭС предусмотрены установки для отверждения жидких отходов. Кроме того, на заводах по переработке ядерного топлива производится остеклование отходов. Газообразные отходы подвергаются очистке.

Помимо перечисленных принимаются и многие другие меры, направленные на решение проблемы радиоактивных отходов.

? Вопросы

1. В связи с чем в середине XX в. возникла необходимость нахождения новых источников энергии? 2. Назовите два основных преимущества АЭС перед ТЭС. Ответ обоснуйте. 3. Назовите три принципиальные проблемы современной атомной энергетики. 4. Приведите примеры путей решения проблем атомной энергетики.

ЗАДАНИЕ

- Подготовьте коллективный доклад-дискуссию на тему «Экологические последствия использования тепловых, атомных и гидроэлектростанций». При подготовке докладов допустимо взять за основу соответствующий материал, имеющийся в учебнике, дополнив его материалами, самостоятельно найденными содокладчиками.

§ 61 БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Известно, что радиоактивные излучения при определённых условиях могут представлять опасность для здоровья живых организмов. В чём причина негативного воздействия радиации на живые существа?

Дело в том, что α-, β- и γ-частицы, проходя через вещество, ионизируют его, выбивая электроны из молекул и атомов. Ионизация живой ткани нарушает жизнедеятельность клеток, из которых эта ткань состоит, что отрицательно сказывается на здоровье всего организма. Чем больше энергии получает человек от действующего на него потока частиц и чем меньше при этом масса человека (т. е. чем большая энергия приходится на каждую единицу массы), тем к более серьёзным нарушениям в его организме это приведёт.

Энергия ионизирующего излучения, поглощённая облучаемым веществом (в частности, тканями организма) и рассчитанная на единицу массы, называется поглощённой дозой излучения.

$$D = \frac{E}{m}$$

Поглощённая доза излучения D равна отношению поглощённой телом энергии E к его массе m:

$$D = \frac{E}{m}.$$

В СИ единицей поглощённой дозы излучения является *грэй* **(Гр)**.

Из этой формулы следует, что

$$1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}.$$

Это означает, что *поглощённая доза излучения будет равна* 1 Гр, *если веществу массой* 1 кг *передаётся энергия излучения в* 1 Дж.

В определённых случаях (например, при облучении мягких тканей живых существ рентгеновским или γ-излучением) поглощённую дозу можно измерять в *рентгенах* **(Р)**: 1 Гр соответствует приблизительно 100 Р.

Чем больше поглощённая доза излучения, тем больший вред (при прочих равных условиях) может нанести организму это излучение.

Но для достоверной оценки тяжести последствий, к которым может привести действие ионизирующих излучений, необходимо учитывать также, что *при одинаковой поглощённой дозе разные виды излучений вызывают разные по величине биологические эффекты.*

Биологические эффекты, вызываемые любыми ионизирующими излучениями, принято оценивать по сравнению с эффектом от рентгеновского или от γ-излучения. Например, при одной и той же поглощённой дозе биологический эффект от действия α-излучения будет в 20 раз больше, чем от γ-излучения, от действия быстрых нейтронов эффект может быть в 10 раз больше, чем от γ-излучения, от действия β-излучения — такой же, как от γ-излучения.

В связи с этим принято говорить, что ***коэффициент качества*** α-излучения равен 20, вышеупомянутых быстрых нейтронов — 10, при том что коэффициент качества γ-излучения (так же как рентгеновского и β-излучения) считается равным единице. Таким образом,

коэффициент качества *K* показывает, во сколько раз радиационная опасность от воздействия на живой организм данного вида излучения больше, чем от воздействия γ-излучения (при одинаковых поглощённых дозах).

Для оценки биологических эффектов была введена величина, называемая ***эквивалентной дозой***.

H* = *DK

Эквивалентная доза H определяется как произведение поглощённой дозы D и коэффициента качества K:

$$H = DK.$$

Эквивалентная доза может измеряться в тех же единицах, что и поглощённая, однако для её измерения существуют и специальные единицы.

В СИ единицей эквивалентной дозы является *зи́верт* (**Зв**). Применяются также дольные единицы: *миллизиверт* (**мЗв**), *микрозиверт* (**мкЗв**) и др.

Из этой формулы следует, что для рентгеновского, γ- и β-излучений (для которых $K = 1$) 1 Зв соответствует поглощённой дозе в 1 Гр, а для всех остальных видов излучения — дозе в 1 Гр, умноженной на соответствующий данному излучению коэффициент качества.

При оценке воздействий ионизирующих излучений на живой организм учитывают и то, что одни части тела (органы, ткани) более чувствительны, чем другие. Например, при одинаковой эквивалентной дозе возникновение рака в лёгких более вероятно, чем в щитовидной железе. Другими словами, каждый орган и ткань

9 – Перышкин, 9 кл.

имеют определённый *коэффициент радиационного риска* (для лёгких, например, он равен 0,12, а для щитовидной железы — 0,03).

Поглощённая и эквивалентная дозы зависят и от времени облучения (т. е. от времени взаимодействия излучения со средой). При прочих равных условиях эти дозы тем больше, чем больше время облучения, т. е. дозы накапливаются со временем.

При оценке степени опасности, которую радиоактивные изотопы представляют для живых существ, важно учитывать и то, что число радиоактивных (т. е. ещё не распавшихся) атомов в веществе уменьшается с течением времени. При этом пропорционально уменьшается число радиоактивных распадов в единицу времени и излучаемая энергия.

Энергия, как вы уже знаете, является одним из факторов, определяющих степень отрицательного воздействия излучения на человека. Поэтому так важно найти количественную зависимость (т. е. формулу), по которой можно было бы рассчитать, сколько радиоактивных атомов остаётся в веществе к любому заданному моменту времени.

Для вывода этой зависимости необходимо знать, что скорость уменьшения количества радиоактивных ядер у разных веществ различна и зависит от физической величины, называемой ***периодом полураспада***.

Период полураспада T — это промежуток времени, в течение которого исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое.

Выведем зависимость числа N радиоактивных атомов от времени t и периода полураспада T. Время будем отсчитывать от момента начала наблюдения $t_0 = 0$, когда число радиоактивных атомов в источнике излучения было равно N_0. Тогда через промежуток времени

$t_1 = T$ число радиоактивных атомов будет $N_1 = \frac{1}{2} \cdot N_0 = \frac{N_0}{2^1}$;

через $t_2 = 2T$ — $N_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2^1} = \frac{N_0}{2^2}$;

через $t_3 = 3T$ — $N_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2^2} = \frac{N_0}{2^3}$ и т. д.,

а через $t = nT$ — $N = \frac{N_0}{2^n}$.

Формула $N = \frac{N_0}{2^n}$ называется ***законом радиоактивного распада.*** Её можно записать и в другом виде, например $N = \frac{N_0}{2^{t/T}}$. Из последней формулы следует, что чем больше T, тем меньше $2^{t/T}$ и тем больше N (при заданных значениях N_0 и t). Значит, чем больше период полураспада элемента, тем дольше он «живёт» и излучает, представляя опасность для живых организмов. В этом убеждают и представленные на рисунке 165 графики зависимости N от t, построенные для изотопов иода (^{131}I, $T_I = 8$ сут) и селена (^{75}Se, $T_{Se} = 120$ сут).

Следует знать способы защиты от радиации. Радиоактивные препараты ни в коем случае нельзя брать в руки — их берут специальными щипцами с длинными ручками.

Легче всего защититься от α-излучения, так как оно обладает низкой проникающей способностью и поэтому задерживается, например, листом бумаги, одеждой, кожей человека. В то же время α-частицы, попавшие внутрь организма (с пищей, воздухом, через открытые раны), представляют большую опасность.

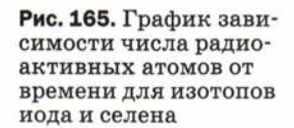
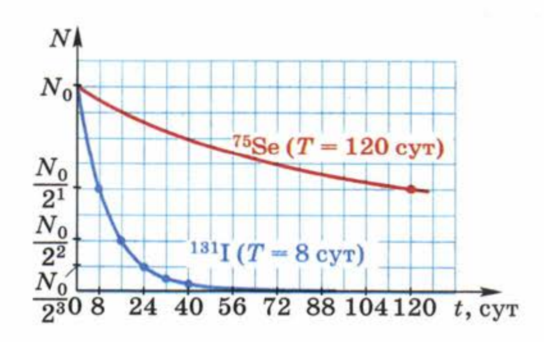


Рис. 165. График зависимости числа радиоактивных атомов от времени для изотопов иода и селена



β-Излучение имеет гораздо большую проникающую способность, поэтому от его воздействия труднее защититься. β-Излучение может проходить в воздухе расстояние до 5 м; оно способно проникать и в ткани организма (примерно на 1—2 см). Защитой от β-излучения может служить, например, слой алюминия толщиной в несколько миллиметров.

Ещё большей проникающей способностью обладает γ-излучение, оно задерживается толстым слоем свинца или бетона. Поэтому γ-радиоактивные препараты хранят в толстостенных свинцовых контейнерах. По этой же причине в ядерных реакторах используют толстый бетонный слой, защищающий людей от γ-лучей и различных частиц (α-частиц, нейтронов, осколков деления ядер и пр.).

? Вопросы

1. В чём причина негативного воздействия радиации на живые существа? **2.** Что называется поглощённой дозой излучения? При большей или меньшей дозе излучение наносит организму больший вред, если все остальные условия одинаковы? **3.** Одинаковый или различный по величине биологический эффект вызывают в живом организме разные виды ионизирующих излучений? Приведите примеры. **4.** Что показывает коэффициент качества излучения? Какая величина называется эквивалентной дозой излучения? **5.** Какой ещё фактор (помимо энергии, вида излучения и массы тела) следует учитывать при оценке воздействий ионизирующих излучений на живой организм? **6.** Какой процент атомов радиоактивного вещества останется через 6 суток, если период его полураспада равен 2 суткам? **7.** Расскажите о способах защиты от воздействия радиоактивных частиц и излучений.

§ 62 ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

Вы уже знаете, что в середине XX в. возникла проблема поиска новых источников энергии. В связи с этим внимание учёных привлекли *термоядерные реакции*.

Термоядерной называется реакция слияния лёгких ядер (таких как водород, гелий и др.), происходящая при температурах от десятков до сотен миллионов градусов.

Создание высокой температуры необходимо для придания ядрам достаточно большой кинетической энергии — только при этом условии ядра смогут преодолеть силы электрического отталкивания и сблизиться настолько, чтобы попасть в зону действия ядерных сил. На таких малых расстояниях силы ядерного притяжения значительно превосходят силы электрического отталкивания, благодаря чему возможен синтез (т. е. слияние, объединение) ядер.

В § 58 на примере урана было показано, что при делении тяжёлых ядер может выделяться энергия. В случае с лёгкими ядрами энергия может выделяться при обратном процессе — при их синтезе. Причём реакция синтеза лёгких ядер энергетически более выгодна, чем реакция деления тяжёлых (если сравнивать выделившуюся энергию, приходящуюся на один нуклон).

Примером термоядерной реакции может служить слияние изотопов водорода (дейтерия и трития), в результате чего образуется гелий и излучается нейтрон:

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n. $$

Это первая термоядерная реакция, которую учёным удалось осуществить. Она была реализована в термоядерной бомбе и носила неуправляемый (взрывной) характер.

Как уже было отмечено, термоядерные реакции могут идти с выделением большого количества энергии. Но для того чтобы эту энергию можно было использовать в мирных целях, необходимо научиться проводить *управляемые термоядерные реакции*. Одна из основных трудностей в осуществлении таких реакций заключается в том, чтобы удержать внутри установки высокотемпературную плазму (почти полностью ионизированный газ), в которой и происходит синтез ядер. Плазма не должна со-

прикасаться со стенками установки, в которой она находится, иначе стенки обратятся в пар. В настоящее время для удерживания плазмы в ограниченном пространстве на соответствующем расстоянии от стенок применяются очень сильные магнитные поля.

Термоядерные реакции играют важную роль в эволюции Вселенной, в частности в преобразованиях химических веществ в ней.

Благодаря термоядерным реакциям, протекающим в недрах Солнца, выделяется энергия, дающая жизнь обитателям Земли.

Наше Солнце излучает в пространство свет и тепло уже почти 4,6 млрд лет. Естественно, что во все времена учёных интересовал вопрос о том, что является «топливом», за счёт которого на Солнце вырабатывается огромное количество энергии в течение столь длительного времени.

На этот счёт существовали разные гипотезы. Одна из них заключалась в том, что энергия на Солнце выделяется в результате химической реакции горения. Но в этом случае, как показывают расчёты, Солнце могло бы просуществовать всего несколько тысяч лет, что противоречит действительности.

Оригинальная гипотеза была выдвинута в середине XIX в. Она состояла в том, что увеличение внутренней энергии и соответствующее повышение температуры Солнца происходит за счёт уменьшения его потенциальной энергии при гравитационном сжатии. Она тоже оказалась несостоятельной, так как в этом случае срок жизни Солнца увеличивается до миллионов лет, но не до миллиардов.

Предположение о том, что выделение энергии на Солнце происходит в результате протекания на нём термоядерных реакций, было высказано в 1939 г. американским физиком ***Хансом Бете***.

Им же был предложен так называемый ***водородный цикл,*** т. е. цепочка из трёх термоядерных реакций, приводящая к образованию гелия из водорода:

$$^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{0}_{1}e + {}^{0}_{0}\nu,$$

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{0}_{0}\gamma,$$

$$^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{1}_{1}\mathrm{H},$$

где ${}^{0}_{0}\nu$ — частица, называемая «нейтрино», что в переводе с итальянского означает «маленький нейтрон».

Чтобы получились два ядра ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$, необходимые для третьей реакции, первые две должны произойти дважды.

Вы уже знаете, что в соответствии с формулой $E = mc^2$ с уменьшением внутренней энергии тела уменьшается и его масса.

Чтобы представить, какое колоссальное количество энергии теряет Солнце в результате превращения водорода в гелий, достаточно знать, что масса Солнца ежесекундно уменьшается на несколько миллионов тонн. Но, несмотря на потери, запасов водорода на Солнце должно хватить ещё на 5—6 миллиардов лет.

Такие же реакции протекают в недрах других звёзд, масса и возраст которых сравнимы с массой и возрастом Солнца.

? Вопросы

1. Какая реакция называется термоядерной? Приведите пример реакции. **2.** Почему протекание термоядерных реакций возможно только при очень высоких температурах? **3.** Какая реакция энергетически более выгодна (в расчёте на один нуклон): синтез лёгких ядер или деление тяжёлых? **4.** В чём заключается одна из основных трудностей при осуществлении термоядерных реакций? **5.** Какова роль термоядерных реакций в существовании жизни на Земле? **6.** Что является источником энергии Солнца по современным представлениям? **7.** На какой период должно хватить запаса водорода на Солнце по подсчётам учёных?

Это любопытно...

Элементарные частицы. Античастицы

Частицы, из которых состоят атомы различных веществ — электрон, протон и нейтрон, — назвали ***элементарными***. Слово «элементарный» подразумевало, что эти частицы являются первичными, простейшими, далее неделимыми и неизменяемыми. Но вскоре оказалось, что эти частицы вовсе не являются неизменяемыми. Все они обладают способностью превращаться друг в друга при взаимодействии.

Поэтому в современной физике термин «элементарные частицы» обычно употребляется не в своём точном значении, а для наименования большой группы мельчайших частиц материи, не являющихся атомами или ядрами атомов (исключение составляет протон, представляющий собой ядро атома водорода и в то же время относящийся к элементарным частицам).

В настоящее время известно более 350 различных элементарных частиц. Частицы эти очень разнообразны по своим свойствам. Они могут отличаться друг от друга массой, знаком и величиной электрического заряда, временем жизни (т. е. временем с момента образования частицы и до момента её превращения в какую-либо другую частицу), проникающей способностью (т. е. способностью проходить сквозь вещество) и другими характеристиками. Например, большинство частиц являются «короткоживущими» — они живут не более двух миллионных долей секунды, в то время как среднее время жизни нейтрона, находящегося вне атомного ядра, 15 мин.

Важнейшее открытие в области исследования элементарных частиц было сделано в 1932 г., когда американский физик ***Карл Дейвид Андерсон*** обнаружил в камере Вильсона, помещённой в магнитное поле, след неизвестной частицы. По характеру этого следа (по радиусу кривизны, направлению изгиба и пр.) учёные определили, что он оставлен частицей, которая представляет собой как бы электрон с положительным по знаку электрическим зарядом. Эту частицу назвали ***позитроном***.

Интересно, что за год до экспериментального открытия позитрона его существование было теоретически предсказано английским физиком ***Полем Дираком*** (существование именно такой частицы следовало из выведенного им уравнения). Более того, Дирак предсказал так называемые процессы ***аннигиляции*** (исчезновения) и ***рождения электрон-позитронной пары***. Аннигиляция заключается в том, что электрон и позитрон при встрече исчезают, превращаясь в γ-кванты (фотоны). А при столкновении γ-кванта с каким-либо массивным ядром происходит рождение электрон-позитронной пары.

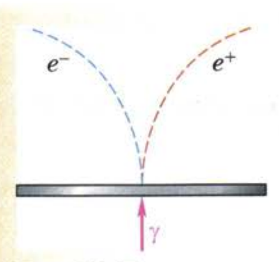


Рис. 166. Треки электрон-позитронной пары в магнитном поле

Оба эти процесса впервые удалось пронаблюдать на опыте в 1933 г. На рисунке 166 показаны треки электрона и позитрона, образовавшихся в результате столкновения γ-кванта с атомом свинца при прохождении γ-лучей сквозь свинцовую пластинку. Опыт проводился в камере Вильсона, помещённой в магнитное поле. Одинаковая кривизна треков свидетельствует об одинаковой массе частиц, а искривление в разные стороны — о противоположных знаках электрического заряда.

В 1955 г. была обнаружена ещё одна античастица — ***антипротон*** (существование которой тоже вытекало из теории Дирака), а несколько позже — ***антинейтрон***. Антинейтрон, так же как и нейтрон, не имеет электрического заряда, но он, бесспорно, относится к античастицам, поскольку участвует в процессе аннигиляции и рождения пары нейтрон—антинейтрон.

Возможность получения античастиц привела учёных к идее о создании ***антивещества***. Атомы антивещества должны быть построены таким образом: в центре атома — отрицательно заряженное ядро, состоящее из антипротонов и антинейтронов, а вокруг ядра обращаются позитроны. В целом атом нейтрален. Эта идея тоже получила блестящее экспериментальное подтверждение. В 1969 г. на ускорителе протонов в г. Серпухове советские физики получили ядра атомов антигелия.

В настоящее время экспериментально обнаружены античастицы почти всех известных элементарных частиц.

ИТОГИ ГЛАВЫ

САМОЕ ГЛАВНОЕ

Ниже даны физические понятия и явления. Последовательность изложения определений и формулировок не соответствует последовательности понятий и т. п.

Перенесите в тетрадь названия понятий и в квадратные скобки впишите порядковый номер определения (формулировки), соответствующего данному понятию.

- **Радиоактивность [ ];**
- **ядерная (планетарная) модель строения атома [ ];**
- **атомное ядро [ ];**

- **радиоактивные превращения атомных ядер [ ];**
- **экспериментальные методы изучения частиц в атомной и ядерной физике [ ];**
- **ядерные силы [ ];**
- **энергия связи ядра [ ];**
- **дефект масс атомного ядра [ ];**
- **цепная реакция [ ];**
- **ядерный реактор [ ];**
- **экологические и социальные проблемы, возникающие при использовании АЭС [ ];**
- **поглощённая доза излучения [ ].**

1. Регистрация частиц с помощью счётчика Гейгера, изучение и фотографирование треков частиц (в том числе участвовавших в ядерных реакциях) в камере Вильсона и пузырьковой камере.
2. Силы притяжения, действующие между нуклонами в ядрах атомов и значительно превосходящие силы электростатического отталкивания между протонами.
3. Минимальная энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны.
4. Самопроизвольное излучение атомами некоторых элементов радиоактивных лучей.
5. Устройство, предназначенное для осуществления управляемой ядерной реакции.
6. Состоит из нуклонов (т. е. из протонов и нейтронов).
7. Радиоактивные отходы, возможность аварий, содействие распространению ядерного оружия.

8. Атом состоит из расположенного в его центре положительно заряженного ядра, вокруг которого на расстоянии, значительно превышающем размер ядра, обращаются электроны.

9. Превращение одного химического элемента в другой при α- или β-распаде, в результате которого ядро исходного атома претерпевает изменения.

10. Разность между суммой масс нуклонов, образующих ядро, и массой этого ядра.

11. Самоподдерживающаяся реакция деления тяжёлых ядер, в которой непрерывно воспроизводятся нейтроны, делящие всё новые и новые ядра.

12. Энергия ионизирующего излучения, поглощённая излучаемым веществом (в частности, тканями организма) и рассчитанная на единицу массы.

ПРОВЕРЬ СЕБЯ

1. α-Распад представлен уравнением реакции

   А. ${}^{10}_{5}\mathrm{B} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

   Б. ${}^{40}_{19}\mathrm{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\mathrm{Ca} + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}$

   В. ${}^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

   Г. ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{0}_{0}\gamma$

2. Поглощённая доза излучения определяется по формуле

   А. $H = DK$

   Б. $N = \frac{N_0}{2^n}$

   В. $h\nu = E_k - E_n$

   Г. $D = \frac{E}{m}$

3. Взаимосвязь между изменением энергии покоя и дефектом массы представлена уравнением

А. $\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_я$

Б. $E_0 = mc^2$

В. $N = \frac{N_0}{2^n}$

Г. $\Delta E_0 = \Delta mc^2$

4. Примером термоядерной реакции является реакция

А. ${}_{1}^{2}\mathrm{H} + {}_{1}^{3}\mathrm{H} \rightarrow {}_{2}^{4}\mathrm{He} + {}_{0}^{1}n$

Б. ${}_{88}^{226}\mathrm{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\mathrm{Rn} + {}_{2}^{4}\mathrm{He}$

В. ${}_{7}^{14}\mathrm{N} + {}_{2}^{4}\mathrm{He} \rightarrow {}_{8}^{17}\mathrm{O} + {}_{1}^{1}\mathrm{H}$

Г. ${}_{92}^{235}\mathrm{U} + {}_{0}^{1}n \rightarrow {}_{56}^{141}\mathrm{Ba} + {}_{36}^{94}\mathrm{Kr} + 3{}_{0}^{1}n$



Выполните задания, предложенные в электронном приложении.

Глава 5

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

§ 63 СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

В состав Солнечной системы входит Солнце, вокруг которого обращаются восемь *больших планет*. В порядке удаления от Солнца они располагаются в такой последовательности: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун (рис. 167). Вокруг всех планет, кроме Меркурия и Венеры, обращаются их естественные спутники.

Ещё пять планет — Церера, Плутон, Хаумеа, Макемаке и Эрида, массы и размеры которых существенно меньше, чем у больших планет, — составляют группу *планет-карликов*. Церера расположена между орбитами Марса и Юпитера, орбиты четырёх последних планет-карликов пролегают за орбитой Нептуна.

Кроме планет вокруг Солнца движутся так называемые *малые тела Солнечной системы*: астероиды, кометы, метеорные тела.



Рис. 167. Расположение больших планет с их спутниками и планет-карликов в порядке их удаления от Солнца: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Церера, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон, Хаумеа, Макемаке, Эрида

Благодаря тому, что масса Солнца составляет почти 99,9% от всей массы Солнечной системы, силы гравитационного притяжения между Солнцем и перечисленными небесными телами оказываются достаточными для удержания последних в Солнечной системе.

Согласно общепринятой в настоящее время гипотезе, формирование Солнечной системы началось около 5 млрд лет назад с гравитационного коллапса (т. е. катастрофически быстрого сжатия) небольшой части гигантского межзвёздного газопылевого облака. В общих чертах этот процесс можно описать следующим образом. Во вращающемся газопылевом облаке в результате взаимодействия его частиц или под действием каких-либо внешних влияний могло возникнуть уплотнение, ставшее центром гравитационного притяжения частиц окружающего вещества и вызвавшее гравитационный коллапс.

В процессе гравитационного сжатия размеры газопылевого облака уменьшались. Из-за вращения облака его сжатие в направлении, параллельном оси вращения, происходило быстрее, чем в направлениях, перпендикулярных оси. Это приводило к уплощению облака и формированию характерного диска (рис. 168). При сжатии облака его плотность увеличивалась, движение частиц вещества становилось всё более интенсивным, особенно в центральной части диска. Как следствие увеличивалась внутренняя энергия и повышалась температура вещества. При температуре в несколько тысяч градусов атомы центральной части облака стали излучать свет, что свидетельствовало о возникновении *протозвезды* — звезды в стадии образования.



Рис. 168. Диск газопылевого облака, из которого сформировались планеты

Под действием гравитационного притяжения вещество облака продолжало падать на протозвезду, увеличивая давление и температуру в центре.

Когда температура в центре протозвезды достигла миллионов градусов, в центральной области началась термоядерная реакция превращения водорода в гелий, происходящая с выделением энергии. Протозвезда превратилась в обычную звезду, впоследствии названную Солнцем. Во внешней области диска крупные сгущения образовали планеты.

В протопланетном пылевом облаке температура прилегавшей к Солнцу области была более высокой, чем в окраинных его частях, из-за чего лёгкие химические элементы выносились в удалённые, холодные части облака. В результате в составе ближайших к Солнцу планет, названных впоследствии планетами земной группы, преобладают тяжёлые элементы, а четыре дальние — планеты-гиганты — состоят в основном из газов. Различия в составе вещества, образовавшего планеты, принадлежащие к разным группам, явились причиной различий их физических характеристик. Планеты земной группы обладают существенно меньшими размерами и массами, но большей плотностью. Они получают от Солнца больше света и тепла, быстрее движутся по орбитам (вследствие того, что внутренняя часть протопланетного диска вращалась быстрее внешней), гораздо медленнее вращаются вокруг своей оси и поэтому меньше сжаты у полюсов, чем планеты-гиганты. Планеты-гиганты имеют значительно бóльшие размеры атмосферы и магнитосферы[1], у них нет твёрдой

---

[1] *Магнитосфера* — область околопланетного пространства, физические свойства которой определяются магнитным полем планеты и его взаимодействием с потоками заряженных частиц космического происхождения.

или жидкой поверхности. Число естественных спутников у планет этой группы велико: 164 из 167 известных в Солнечной системе. Кроме того, у планет-гигантов есть образования из мелких частиц — *кольца*, которые отсутствуют у планет земной группы.

Кольца планет-гигантов образовались из остатков околопланетного облака, представляющих собой частицы разных размеров.

? Вопросы **1.** Какие группы объектов входят в Солнечную систему? **2.** В какие виды энергии переходила гравитационная энергия сжатия протооблака при образовании Солнечной системы? **3.** Чем отличаются планеты земной группы от планет-гигантов? Чем эти отличия обусловлены? **4.** Почему планеты Солнечной системы не покидают её; не падают на Солнце?

§ 64 БОЛЬШИЕ ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Напомним, что атмосфера ***Земли*** — это внешняя газовая оболочка, которая начинается у её поверхности и простирается в космическое пространство приблизительно на 2000 км.

Атмосфера имеет очень большое экологическое значение. Она защищает все живые организмы Земли от губительного влияния космических излучений и ударов метеоритов, регулирует сезонные температурные колебания, уравновешивает и выравнивает суточные. Если бы атмосферы не существовало, то колебание суточной температуры на Земле достигло бы ±200 °С.

Атмосферу условно разделяют на несколько слоёв (рис. 169). Это связано с характерными особенностями изменения температуры в каждом слое.

Нижняя часть атмосферы, достигающая высоты 8—10 км в полярных областях и 16—



Рис. 169. Строение атмосферы Земли

18 км в экваториальной, называется ***тропосферой***. В ней сосредоточено $\frac{4}{5}$ всей массы атмосферного воздуха. Для дыхания пригоден только её нижний, достаточно плотный слой толщиной до 5 км. В направлении от поверхности Земли к верхней границе тропосферы, т. е. при удалении от нагретой Солнцем и излучающей тепло Земли, температура воздуха понижается.

Облака образуются в основном в пределах тропосферы, так как в ней содержится почти весь водяной пар атмосферы. В тропосфере протекают процессы, определяющие погоду, например формируются и перемещаются циклоны и антициклоны.

Над тропосферой лежит ***стратосфера*** — очень важная для жизни на Земле часть атмосферы. Именно в ней располагается озоновый слой, поглощающий идущее от Солнца сильное ультрафиолетовое излучение. В больших количествах оно представляет опасность для здоровья и жизни. Поглощая ультрафиолетовое излучение, озон нагревает стратосферу, благодаря чему её температура возрастает с высотой.

За стратосферой следует ***мезосфера*** (что в переводе с греческого означает «средняя, промежуточная сфера»). Над мезосферой до высоты порядка 800 км простирается ***термосфера***. В ней до высоты 200—300 км температура растёт, достигая 1000—1500 °C вследствие ионизации атмосферного кислорода и других газов ультрафиолетовыми и рентгеновскими лучами Солнца и космическим излучением. Области, где происходит ионизация, называют ***ионосферой***. Благодаря наличию заряженных частиц, ионосфера отражает радиоволны коротковолнового диапазона и тем самым даёт возможность принимать радиопередачи с больших расстояний.

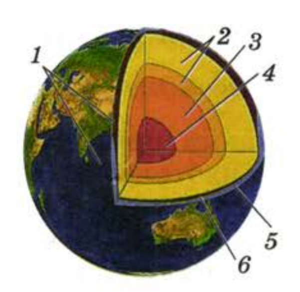


Рис. 170. Внутреннее строение Земли: *1* — континентальная кора; *2* — мантия (верхняя и нижняя); *3* — внешнее ядро; *4* — внутреннее ядро; *5* — океан; *6* — океаническая кора

Внутреннее строение Земли показано на рисунке 170. Верхняя твёрдая оболочка Земли называется ***корой***. Из рисунка видно, что толщина земной коры в разных местах различна. В центральной части планеты находится железоникелевое ядро, температура и давление которого могут достигать соответственно 7000 °C и $3{,}6 \cdot 10^6$ атм. Внешняя часть ядра жидкая, внутренняя — твёрдая. Часть Земли, расположенная непосредственно под корой и выше ядра, называется ***мантией***. В мантии находится бóльшая часть вещества Земли.

Исследования показали, что упругие поперечные волны распространяются в глубь Земли только до глубины 2920 км. Очевидно, здесь начинается внешнее жидкое ядро.

С существованием жидкого внешнего ядра связывают происхождение магнитного поля Земли. Движение электропроводящего вещества в жидком горячем (порядка 10 000 °C) ядре планеты возбуждает электрические токи, порождающие магнитное поле (рис. 171).

Земля обладает самым сильным магнитным полем по сравнению с другими планетами земной группы. Магнитное поле Земли время от времени изменяет свою ориентацию, совершая и вековые колебания с периодом несколько сотен лет. Кроме того, 2—3 раза за миллион лет поле меняет местами магнитные полюсы. На это указывает «вмороженное» в осадочные и вулканические породы магнитное поле отдалённых эпох.

Меркурий. Чем больше масса планеты и чем меньше при этом её радиус, тем более сильное гравитационное поле она создаёт в пространстве вокруг себя и тем больше ускорение свободного падения на её поверхности, поскольку $g = \frac{GM}{R^2}$. Обладая достаточно сильным гравитационным полем, планета может удерживать вокруг себя атмосферу.

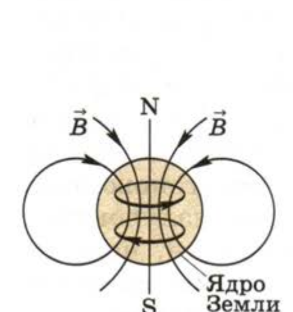


Рис. 171. Линии индукции магнитного поля Земли

Наличие атмосферы и её плотность определяется ещё одним фактором — расстоянием планеты от Солнца и соответственно температурой на её поверхности. При очень высоких температурах скорости движения и кинетические энергии молекул газов в атмосфере достигают таких значений, при которых они могут преодолеть силы гравитационного притяжения к планете и покинуть её атмосферу.

По изложенным выше причинам предполагалось, что Меркурий, близкий к Солнцу и имеющий небольшую массу, не имеет атмосферы. Тем не менее атмосфера, хоть и очень разреженная, была обнаружена на планете американской автоматической межпланетной станцией (АМС) «Маринер-10», которая в марте 1974 г. прошла всего в 705 км от его поверхности.

Результаты проведённых «Маринером» исследований удивили учёных тем, что в атмосфере Меркурия помимо прочих газов был обнаружен гелий. Из-за очень высоких температур (порядка 420—450 °С) весь гелий должен был бы улетучиться из атмосферы планеты в космическое пространство в течение примерно 200 дней. Вероятно, Меркурий постоянно получает гелий, который поставляет ему *солнечный ветер* — поток из электронов, протонов и ядер гелия, истекающий из солнечной короны.

Исследования, проведённые «Маринером-10» в 1974—1975 гг., показали, что Меркурий имеет очень слабое (в 100 раз слабее земного) магнитное поле.

Меркурий является одной из наиболее плотных планет Солнечной системы. Это обусловлено двумя факторами: образованием Меркурия из ближайшей к Солнцу части протопланетного диска, содержащей больше тяжёлых элементов, чем окраинные его части, и наличием очень плотного (9,8 г/см^3) ядра, содержащего 80% массы планеты.

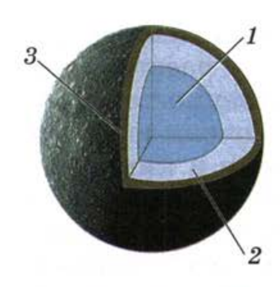


Рис. 172. Внутреннее строение Меркурия:
1 — ядро;
2 — мантия;
3 — кора

Внутреннее строение Меркурия показано на рисунке 172. Он состоит из внешнего жидкого и внутреннего твёрдого ядра. Магнитное поле Меркурия создаётся электропроводящими конвективными потоками в жидком ядре.

Над ядром Меркурия лежит силикатная оболочка — мантия толщиной 600 км. Третьей оболочкой твёрдого Меркурия является его кора, толщина которой 100—300 км.

Существование атмосферы у ***Венеры*** было обнаружено в 1761 г. М. В. Ломоносовым при наблюдении в зрительную трубу прохождения её по диску Солнца. В дальнейшем выяснилось, что поверхность Венеры скрывают чрезвычайно густые облака серной кислоты, хорошо отражающие свет. Это не даёт возможности наблюдать поверхность планеты в видимом диапазоне. Поэтому изучение поверхности Венеры стало возможным только после возникновения и развития в 30-х гг. XX в. радиолокационных наблюдений (радиоволны свободно проходят сквозь венерианскую атмосферу).

Первым исследовательским аппаратом, направленным землянами к другой планете, стала советская автоматическая станция «Венера-1», стартовавшая 12 февраля 1961 г.

Дальнейшие исследования Венеры с использованием советских АМС «Венера» и американских «Вояджер» и «Пионер» показали, что давление на Венере достигает 93 атм, а температура — 500 °С. Такие высокие значения температуры и давления обусловлены в атмосфере Венеры *парниковым эффектом*, способствующим аккумуляции тепла в нижних слоях атмосферы. Было выяснено также, что на высоте 50—70 км от поверхности, где располагаются плотные облака, дуют ураганные ветры. Таким образом, Венера — это планета ядовитых облаков, бурь и адской жары.

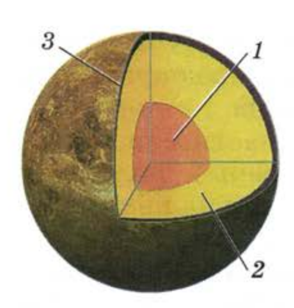


Рис. 173. Внутреннее строение Венеры:
1 — ядро;
2 — мантия;
3 — кора

Согласно одной из гипотез о строении Венеры, эта планета состоит из коры, мантии и расплавленного железного ядра, масса которого составляет около четверти всей массы планеты (рис. 173).

Собственное *магнитное поле* Венеры почти полностью отсутствует. Видимо, это связано с очень медленным её вращением. Магнитное поле возникает благодаря тому, что межпланетное магнитное поле возбуждает в ионосфере Венеры электрические токи, порождающие локальные магнитные поля. Влияние на эти поля солнечного ветра усложняет картину. Поэтому у Венеры нет магнитных полюсов в традиционном их понимании.

Марс. Фототелевизионные изображения марсианской поверхности, переданные на Землю в 1976 г. с американских орбитально-посадочных станций «Викинг-1» и «Викинг-2», показали, что поверхность Марса покрыта красноватым песком. Такой оттенок придаёт песку оксид железа. Проведённые этими же станциями исследования марсианского грунта на предмет обнаружения в нём следов живых микроорганизмов дали отрицательный результат.



Рис. 174. Полярная шапка на Марсе

Атмосфера Марса по плотности не превышает 1% земной, давление у поверхности в 160 раз меньше земного. В отличие от Земли, масса марсианской атмосферы сильно изменяется в течение года в связи с таянием и намерзанием полярных шапок, состоящих в основном из углекислого льда (рис. 174), и простирается в пределах от 110 до 130 км над поверхностью планеты.

Климат на Марсе значительно холоднее и суше земного.

Днём в области экватора температура может составлять от –10 до –30 °С, ночью опускается ниже –100 °С. Резкие перепады температуры на Марсе (обусловленные, в частности, сильной разреженностью атмосферы) являются причиной частого возникновения на нём пылевых бурь.

Из-за низкого атмосферного давления вода не может существовать в жидком состоянии на поверхности Марса. Аппарат «Феникс» в июле 2008 г. обнаружил на Марсе воду в состоянии льда.

Марсианский год состоит из 668,6 марсианских солнечных суток (называемых *со́лами*). Наклон оси обеспечивает смену времён года. При этом вытянутость орбиты приводит к большим различиям их продолжительности. Так, северная весна и лето приходятся на участок орбиты Марса, удалённый от Солнца. Поэтому на Марсе северное лето долгое и прохладное, а южное — короткое и жаркое.

Магнитное поле Марса очень слабо и неустойчиво. В различных точках планеты его индукция может отличаться от 1,5 до 2 раз. Магнитные полюсы не совпадают с географическими. Это говорит о том, что железное ядро Марса находится в сравнительной неподвижности по отношению к его коре.

Юпитер — крупнейшая планета Солнечной системы и среди газовых гигантов. Масса Юпитера превышает массу всех других планет, вместе взятых. Он находится в 5 раз дальше от Солнца, чем Земля. Один оборот вокруг Солнца Юпитер совершает за 12 лет.

Планета не имеет твёрдой поверхности. Поэтому, говоря о её размерах, указывают радиус верхней границы облаков, где давление порядка 10 кПа. Средняя плотность Юпитера очень мала (1,33 г/см^3). Он почти целиком состоит из водорода и гелия: по объёму соответственно 89 и 10% . И только 1% составляют более тяжёлые элементы.



Рис. 175. Пояса, зоны и Большое Красное Пятно Юпитера

Протяжённость водородно-гелиевой атмосферы Юпитера превышает 1000 км. Она создаёт такое большое давление, что молекулярный водород и гелий под ней превращаются в жидкость. Оранжевый цвет атмосфере придают соединения фосфора или серы.

Из-за непрозрачности атмосферы Юпитера невозможно увидеть её нижние слои. В юпитерианской атмосфере образуются вихри (циклоны и антициклоны), штормы и грозы. Вихри проявляют себя в виде крупных красных, белых и коричневых пятен. Так называемое ***Большое Красное Пятно*** — крупнейший известный вихрь в Солнечной системе является антициклоном (рис. 175). В пределах этого вихря могло бы разместиться несколько планет размером с Землю. Он существует уже около 300 лет.

Поскольку Юпитер является газовой планетой, его вращение отличается от вращения твёрдого тела. Экваториальная область планеты вращается быстрее приполярных. Ось вращения планеты почти перпендикулярна плоскости орбиты и эклиптики. Поэтому на Юпитере нет смены времён года.

Видимая поверхность Юпитера — это верхние плотные аммиачные облака. Глядя с Земли на Юпитер, мы видим верхушки облаков в виде вытянутых вдоль экватора полос. На рисунке 175 показано, что эти полосы образуют системы тёмных поясов и светлых зон, расположенных симметрично к северу и югу от экватора. Пояса и зоны — это области нисходящих и восходящих потоков в атмосфере планеты.

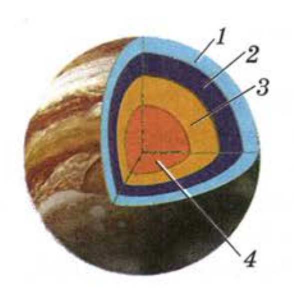
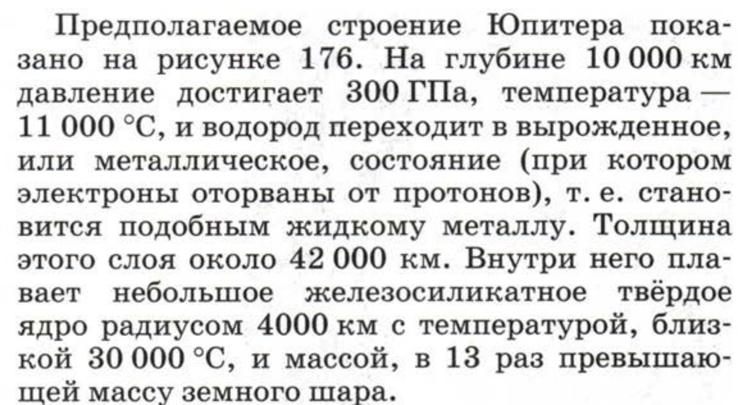


Рис. 176. Внутреннее строение Юпитера:
1 — газообразный водород;
2 — жидкий водород;
3 — металлический водород;
4 — твёрдое ядро



Предполагаемое строение Юпитера показано на рисунке 176. На глубине 10 000 км давление достигает 300 ГПа, температура — 11 000 °С, и водород переходит в вырожденное, или металлическое, состояние (при котором электроны оторваны от протонов), т. е. становится подобным жидкому металлу. Толщина этого слоя около 42 000 км. Внутри него плавает небольшое железосиликатное твёрдое ядро радиусом 4000 км с температурой, близкой 30 000 °С, и массой, в 13 раз превышающей массу земного шара.

Слой металлического водорода способен проводить электрический ток и, по всей видимости, является источником существования обширного магнитного поля планеты.

Юпитер обладает самым протяжённым магнитным полем и самой мощной и активной магнитосферой из всех планет Солнечной системы. В магнитосфере происходит ускорение частиц. Проникновение частиц из магнитосферы в атмосферу Юпитера создаёт там полярные сияния, зарегистрированные космическими аппаратами (рис. 177).

Сатурн можно увидеть невооружённым глазом с Земли. Его кольцо — самое мощное, светлое и красивое по сравнению с кольцами трёх остальных планет-гигантов — состоит из двух колец, разделённых чётко видимым зазором.

В период с 1979 по 1981 г. с помощью американских космических аппаратов «Пионер-11», «Вояджер-1» и «Вояджер-2» было обнаружено магнитное поле Сатурна. Были также получены снимки структуры колец и определён их состав. Оказалось, что кольца состоят главным образом из частичек льда, «горных пород» и пыли.

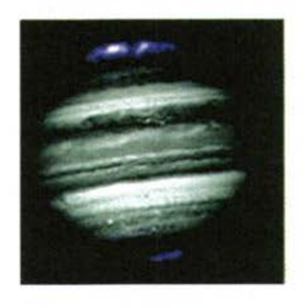


Рис. 177. Северные и южные полярные сияния на Юпитере

Сатурн состоит в основном из водорода с примесями гелия и следами воды, метана, аммиака и «горных пород».

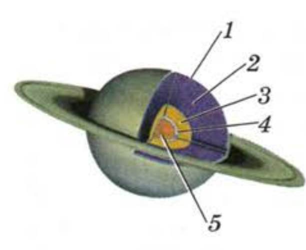


Рис. 178. Строение Сатурна:
1 — газовая атмосфера;
2 — жидкий водород;
3 — металлический водород;
4 — вода, метан, аммиак;
5 — ядро из кремния и металлов

Сатурн — единственная планета Солнечной системы, средняя плотность которой меньше плотности воды. Сутки на планете длятся 10 ч 34 мин 13 с. Один оборот вокруг Солнца Сатурн совершает за 29,46 земных лет, в его году 10 759 сатурнианских суток.

Плоскость экватора Сатурна (с которой совпадает плоскость обращения его колец) наклонена к плоскости его орбиты на 26,73°, поэтому на нём, как и на Земле, происходит смена времён года. Но каждое из четырёх времён года на Сатурне длится не менее 7 лет.

На рисунке 178 показано строение Сатурна.

Уран. В 1986 г. космический аппарат «Вояджер-2» пересёк орбиту Урана и прошёл в 81 500 км от поверхности планеты (рис. 179). Это единственное в истории космонавтики посещение окрестностей Урана. Аппарат изучил уникальные погодные условия, обусловленные тем, что ось вращения Урана расположена почти в плоскости его орбиты, открыл 10 новых спутников и два кольца и провёл ряд других исследований.

Период вращения планеты вокруг своей оси составляет 17 земных часов и 34 земных минуты, однако из-за сильных ветров, дующих в верхнем слое атмосферы и достигающих скорости 240 м/с, некоторые части атмосферы совершают оборот вокруг планеты за 14 часов. Двигаясь по орбите со средней скоростью, равной 6,81 км/с, Уран делает оборот вокруг Солнца за 84 земных года.

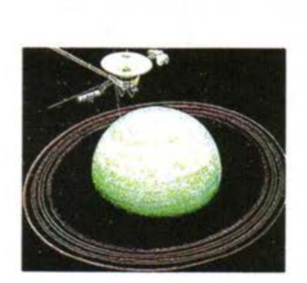


Рис. 179. «Вояджер-2» — аппарат, исследовавший Уран с близкого расстояния

Уран является единственной планетой Солнечной системы, которая вращается «лёжа на боку», поскольку ось его вращения располагается почти в плоскости орбиты. Поэтому процессы смены дня и ночи на нём существенно отличаются от тех же процессов, происходящих на многих других планетах. За урановый год каждый полюс планеты половину года (42 земных) находится в темноте, а другую половину — под светом Солнца.

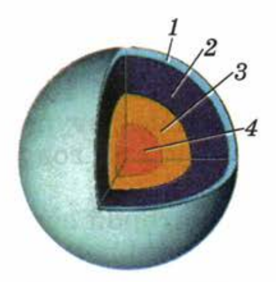


Рис. 180. Строение Урана:
1 — газовая атмосфера;
2 — жидкий водород;
3 — льды из воды, метана, аммиака;
4 — ядро

Хотя Уран и не имеет твёрдой поверхности в привычном понимании этого слова, наиболее удалённую часть газообразной оболочки принято называть его атмосферой. Это самая холодная планетарная атмосфера Солнечной системы с минимальной температурой –224 °C. Полагают, что Уран имеет сложную слоистую структуру облаков, где вода составляет нижний слой, а метан — верхний.

В недрах Урана (и схожего с ним Нептуна) отсутствует металлический водород, но зато есть разные льды: водный, метановый, аммиачный. Поэтому их называют «ледяными гигантами», в отличие от газовых гигантов — Сатурна и Юпитера, состоящих в основном из водорода и гелия.

В центре Урана (рис. 180) находится небольшое (около 20% от радиуса планеты) каменное ядро, в середине — оболочка из льда (около 60% от радиуса Урана), а вокруг водородно-гелиевая атмосфера (20% радиуса планеты).

Измерения «Вояджера-2» позволили обнаружить у Урана весьма специфическое магнитное поле, которое направлено не из геометрического центра планеты, а наклонено на 59° относительно оси вращения. Из-за асимметричности магнитного поля значения магнитной индукции на поверхности в южном и северном полушариях различны. Магнитное поле превосходит земное в 50 раз. Кроме Урана, аналогичное смещённое магнитное поле наблюдается у Нептуна. Возможно, такая конфигурация поля характерна для «ледяных гигантов» и обусловлена тем, что поле у них формируется на довольно малых глубинах.


Рис. 181. Кольца Нептуна

Нептун. «Вояджер-2» был первым космическим кораблём, который в 1989 г. достиг Нептуна. Он сфотографировал планету, и благодаря этим изображениям было обнаружено, что у планеты есть пять колец (рис. 181).

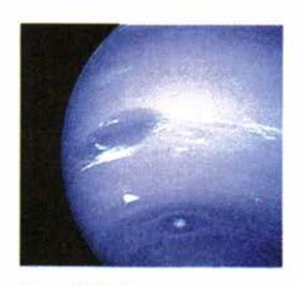


Рис. 182. Большое Тёмное Пятно Нептуна

Видимая поверхность Нептуна представляет собой плотный облачный слой синего цвета с полосами и белыми и тёмными пятнами. Большое Тёмное Пятно (рис. 182) является самым крупным из наблюдавшихся до сих пор ураганов-антициклонов.

Температура Нептуна в верхних слоях атмосферы близка к −220 °С. В центре Нептуна температура составляет, по различным оценкам, от 6000 до 7000 °С, что сопоставимо с температурой на поверхности Солнца. Внутреннее строение Нептуна показано на рисунке 183.

Из-за огромного давления (в несколько миллионов раз превышающего атмосферное давление на Земле) находящийся в мантии лёд не испаряется, несмотря на высокую температуру — от 2500 до 5500 °С.

Своим синим с зеленоватым оттенком цветом Нептун обязан присутствующему в верхних слоях атмосферы метану, который поглощает из солнечного света красные лучи и отражает синие.

В глубоких частях атмосферы под действием большого давления газы преобразуются в кристаллы, которые на ещё больших глубинах превращаются в лёд.

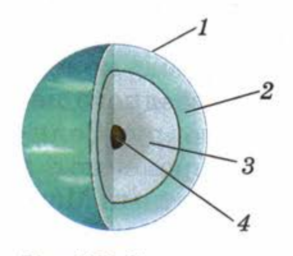


Рис. 183. Строение Нептуна:
1 — верхняя атмосфера, верхние облака;
2 — атмосфера;
3 — мантия;
4 — ядро

Смена времён года на Нептуне, как и на Земле, происходит по мере движения планеты вдоль орбиты. Но год на Нептуне равен 164 земным годам. Соответственно продолжительность каждого из четырёх его сезонов — 41 год — гораздо длиннее земных. Очередное лето, начавшееся в южном полушарии в 2005 г., продлится до 2046 г. В этот период вокруг северного полюса Нептуна будет царить зимняя полярная ночь.

Магнитное поле у Нептуна впервые было обнаружено в 1989 г. во время пролёта близ планеты «Вояджера-2». Исследования показали, что магнитная ось планеты отклонена на 47° от оси вращения планеты. Из-за сильного наклона магнитной оси сияния на Нептуне распола-

гаются вовсе не над его полюсами, а на удалении от них на 40—50°, поэтому их уже нельзя назвать полярными.

 Вопросы

1. Что нового вы узнали об атмосфере, строении, магнитном поле Земли? 2. Чем могут быть вызваны проблемы с дыханием у здорового человека, поднимающегося на воздушном шаре? 3. Высота тропосферы в полярных областях Земли достигает 10 км, а в экваториальной — 16—18 км. Как бы вы объяснили это различие, используя знания по физике? 4. По каким двум причинам атмосфера Меркурия крайне разрежена? 5. Чем отличается магнитное поле Юпитера от магнитного поля Земли? 6. Что такое металлический водород? 7. В чём заключаются особенности магнитных полей Урана и Нептуна?

УПРАЖНЕНИЕ 49

1. Что является причиной смены времён года на Земле?
2. Используя дополнительную литературу и Интернет, определите скорость и центростремительное ускорение Земли. Считать орбиту Земли окружностью.

§ 65 МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Помимо больших планет и планет-карликов вокруг Солнца движется более четырёхсот тысяч малых небесных тел размером от километра и более, называемых ***астероидами***, что в переводе с греческого означает «звездоподобные». Отличить астероиды от звёзд можно только по их движению на фоне звёздного неба. Совокупность обращающихся вокруг Солнца астероидов, орбиты которых пролегают в основном в пространстве между орбитами Марса и Юпитера, принято называть ***Главным поясом астероидов***.

Вокруг Солнца также обращаются по вытянутым эллиптическим орбитам *кометы* и *метеорные тела* (называемые также *метеороидами*), т. е. твёрдые тела различных размеров — от песчинки до мелкого астероида. Асте-



Рис. 184. Комета Холмса, открыта 6 ноября 1892 г.

роиды, кометы и метеорные тела называются ***малыми телами Солнечной системы.***

Кометы представляют собой большие образования из разреженного газа с очень маленьким твёрдым ядром. Ядро состоит из льдов: водного (более 80%), метанового, аммиачного, углекислого и др. Кометный лёд перемешан с пылью и каменистым веществом.

Вдали от Солнца при температуре порядка –260 °C комета не имеет ни головы, ни хвоста. При приближении к Солнцу на такое расстояние, при котором температура кометы повышается до –140 °C, льды начинают испаряться, образуя прозрачную атмосферу — голову кометы (рис. 184).

При испарении льдов на поверхности ядра остаётся корка, состоящая из пыли и других частиц.

Кванты солнечного света, налетая на голову кометы, ионизируют молекулы газов. Солнечный ветер, действуя своим магнитным полем на ионы, уносит их от Солнца со скоростью 500—1000 км/с, в результате чего у кометы образуется длинный и прямой плазменный хвост.

Солнечный свет (поток световых квантов) оказывает давление на пылинки, благодаря чему у кометы образуется второй хвост — пылевой. Поскольку световое давление сравнительно невелико, пыль покидает голову кометы довольно медленно и, следуя за ней по криволинейной траектории, принимает изогнутую форму (рис. 185).

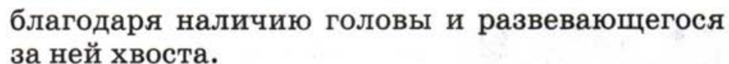


Рис. 185. Схема образования двух типов хвостов кометы

Название «комета» происходит от греческого слова komētēs, т. е. «длинноволосый». Вероятно, такое название было дано



Рис. 186. Явление метеора



благодаря наличию головы и развевающегося за ней хвоста.

При подходе кометы близко к Солнцу (например, при её движении внутри земной орбиты), из-за сильного разогрева газ и пыль вырываются из ядра непрерывно и с такой большой скоростью, что его масса может уменьшаться на 30—40 т в секунду. Помимо этого в комете могут происходить взрывы, приводящие к разрушению ядра.

Остатки распавшегося кометного ядра, названные метеорными телами, могут растянуться вдоль орбиты кометы на большое расстояние. Если Земля проходит сквозь их скопление, они, влетая в её атмосферу со скоростью 11 км/с, испаряются на высоте в несколько десятков километров. Иногда кажется, что метеоры вылетают из какой-либо области небесной сферы (рис. 186). Область небесной сферы, кажущаяся источником метеоров, называется ***радиантом***.

Если из межпланетного пространства в атмосферу проникает крупное железное или каменное метеорное тело, например обломок астероида массой в несколько килограммов, то в большинстве случаев оно не успевает разрушиться в атмосфере и падает на землю. Такое тело называется ***метеоритом***.





Рис. 187. Болид над Латвией

Бывает, что крупное метеорное тело на большой скорости проникает в нижние слои атмосферы. От трения о воздух оно сильно нагревается, и у него появляется оболочка из раскалённых газов и частиц. Выглядит это как летящий по небу большой огненный шар, оставляющий позади себя яркий след. Такое явление называется ***болидом*** (рис. 187).

? Вопросы **1.** Что называется астероидом? **2.** Что вы знаете о кометах? **3.** Что называется явлением метеора? **4.** Что такое метеорит?

§ 66 СТРОЕНИЕ, ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЦА И ЗВЁЗД

Звёзды[1] представляют собой шары из горячего, по большей части ионизированного газа. Ионизация звёздного вещества является следствием его высокой температуры (от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч градусов).

В результате исследования химического состава Солнца и других звёзд было обнаружено, что в них присутствуют почти все химические элементы, имеющиеся на Земле и представленные в таблице Д. И. Менделеева. Выяснилось также, что в большинстве случаев 70% массы звезды составляет водород, 28% — гелий и 2% — более тяжёлые элементы.

Вы уже знаете, что чем больше масса звезды, тем более сильное гравитационное поле она создаёт. Благодаря действию гравитационных сил, сжимающих звёздное вещество, его температура, плотность, давление значительно возрастают от внешних слоёв к центру.

Так, например, температура внешних слоёв Солнца приблизительно равна $6 \cdot 10^3$ °С, а в центре — порядка 14—15 млн °С, плотность вещества в центре Солнца приблизительно равна 150 г/см^3 (в 19 раз больше, чем у железа), а давление от средних слоёв к центру возрастает от $7 \cdot 10^8$ до $3{,}4 \cdot 10^{11}$ атм. При таких температурах и давлениях в ядре могут протекать термоядерные реакции, являющиеся источником энергии звёзд.

Мощность излучения звезды (называемая также ***светимостью*** и обозначаемая буквой L) пропорциональна четвёртой степени её массы:

$$L \approx M^4.$$

[1] Под звёздами здесь и далее подразумеваются звёзды типа Солнца, находящиеся на той же стадии развития, что и Солнце.

Протекающие в недрах звёзд термоядерные реакции являются одним из процессов, существенно отличающих звёзды от планет, так как внутренний источник обогрева планет — это радиоактивный распад. Указанное различие обусловлено тем, что масса любой звезды заведомо больше массы даже самой большой планеты. Это можно проиллюстрировать на примере Юпитера. Несмотря на то что по многим параметрам он очень похож на звезду, его масса оказалась недостаточной для возникновения в его недрах условий, необходимых для протекания термоядерных реакций.

В результате термоядерных реакций в недрах Солнца выделяется огромная энергия, поддерживающая его свечение. Рассмотрим, каким образом эта энергия выходит наружу, к поверхности Солнца.

В зоне переноса лучистой энергии (рис. 188) освобождённое в ядре тепло распространяется от центра к поверхности Солнца путём излучения, т. е. через поглощение и излучение веществом порций света — квантов. Поскольку кванты излучаются атомами в любых направлениях, их путь к поверхности длится тысячи лет.

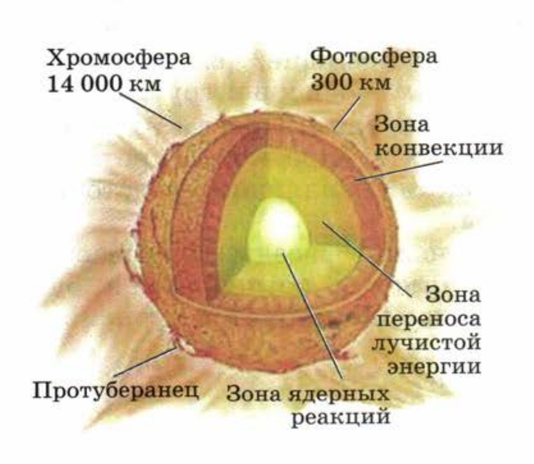


Рис. 188. Строение Солнца

В зоне конвекции энергия переносится к поверхности всплывающими потоками горячего газа. Достигнув поверхности, газ, излучая энергию, охлаждается, уплотняется и погружается к основанию зоны. В конвективной зоне газ непрозрачен. Поэтому можно увидеть только те слои, которые находятся над ней: фотосферу, хромосферу и корону (на рисунке не обозначена). Эти три слоя относятся к солнечной атмосфере.

Фотосфера («сфера света») на фотографиях выглядит как совокупность ярких пятны-

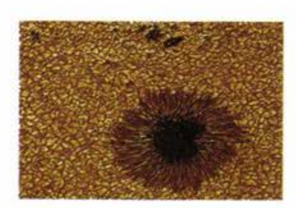


Рис. 189. Гранулы и пятно в фотосфере Солнца

шек — гранул (рис. 189), разделённых тонкими тёмными линиями. Яркие пятнышки — это потоки горячего газа, всплывающие на поверхность конвективной зоны.

Хромосфера («сфера цвета») названа так за свою красновато-фиолетовую окраску. Одним из наиболее интересных явлений, которые можно наблюдать в хромосфере, являются *протуберанцы*[1]. Протяжённость хромосферы достигает 10—15 тыс. км.

Самая внешняя часть атмосферы Солнца — *корона*. Она простирается на миллионы километров (т. е. на расстояние порядка нескольких солнечных радиусов), несмотря на то что сила тяжести на Солнце очень велика. Большая протяжённость короны объясняется тем, что движения атомов и электронов в короне, разогретой до температуры 1—2 млн °С, происходят с огромными скоростями. Солнечная корона хорошо видна во время солнечного затмения (рис. 190). Форма и яркость короны меняются в соответствии с циклом солнечной активности, т. е. с периодичностью в 11 лет.



Рис. 190. Солнечная корона (во время полного солнечного затмения 1999 г.)

Индукция магнитного поля на Солнце всего в 2 раза больше, чем на поверхности Земли. Но временами в небольшой области солнечной атмосферы возникают концентрированные магнитные поля, в несколько тысяч раз более сильные, чем на Земле. Они препятствуют подъёму горячей плазмы, в результате чего вместо светлых гранул образуется тёмная область — *солнечное пятно* (см. рис. 189). При появлении больших групп пятен мощность видимого, ультрафиолетового и рентгеновского излучений резко возрастает, что может неблагоприятно отражаться на самочувствии людей.

Перемещение пятен по диску Солнца является следствием его вращения, которое проис-

---

[1] *Протуберанцы* — громадные, протяжённостью до сотен тысяч километров, плазменные образования в солнечной короне, имеющие бо́льшую плотность и меньшую температуру, чем окружающая их плазма короны.

ходит с периодом, равным 25,4 сут относительно звёзд.

Завершающий этап процесса эволюции звёзд включает несколько стадий. Когда в центре звезды весь водород превращается в гелий, структура звезды начинает заметно меняться. Её светимость растёт, температура поверхности понижается, внешние слои расширяются, а внутренние сжимаются. Звезда становится *красным гигантом*, т. е. звездой огромного размера с высокой светимостью и очень малой плотностью. В центре образуется плотное и горячее гелиевое ядро. Когда температура в нём достигает 100 млн °C, начинается реакция превращения гелия в углерод, сопровождающаяся выделением большого количества энергии.

На следующей стадии звёзды типа Солнца сбрасывают часть вещества, сжимаются до размеров планет, превращаясь в маленькие, очень плотные звёзды — *белые карлики*, и медленно остывают.

? Вопросы

1. При температуре в ядре порядка 14—15 млн °C и давлениях от $7 \cdot 10^8$ до $3{,}4 \cdot 10^{11}$ атм звезда должна была бы превратиться в расширяющееся газовое облако. Но этого не происходит. Как вы думаете, какие силы противодействуют расширению звезды? **2.** Что является источником энергии, излучаемой звездой? **3.** Какой физический процесс является источником внутреннего обогрева планеты? **4.** Что является причиной образования пятен на Солнце? **5.** Из каких слоёв состоит солнечная атмосфера? **6.** Расскажите об основных стадиях эволюции Солнца.

§ 67 СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Звёзды во Вселенной объединены в гигантские звёздные системы, называемые ***галактиками***. Звёздная система, в составе которой находится наше Солнце, называется ***Галактикой*** (или ***Млечным Путём***, поскольку слово «галактика» в переводе с греческого означает «млечный, молочный»).

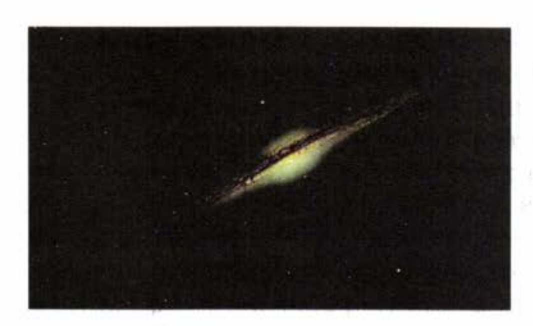


Рис. 191. Галактика (вид с ребра)

Число звёзд в Галактике порядка 10^{12}. Светлая серебристая полоса звёзд, опоясывающая всё небо, которую мы называем Млечным Путём, представляет собой основную часть нашей Галактики, по форме напоминающую линзу или чечевицу (рис. 191). Диаметр Галактики приблизительно равен 30 000 пк[1] или почти 100 000 световых лет[2].

Галактика не имеет чётких границ — по краям звёздная плотность постепенно сходит на нет. В центре Галактики расположено ядро диаметром 1000—2000 пк — гигантское уплотнённое скопление звёзд. Масса Галактики приблизительно равна $2 \cdot 10^{11}$ масс Солнца.

Помимо звёзд, планет и малых тел, имеющихся в некоторых звёздных системах, в состав Галактики входит ещё рассеянная материя — межзвёздный газ, пыль, излучаемые звёздами заряженные частицы. Масса рассеянной материи составляет $\frac{1}{1000}$ часть массы Галактики.



ЭДВИН ПАУЭЛЛ ХАББЛ

(1889—1953)

Американский астроном. Основные труды посвящены изучению галактик. Обнаружил смещение спектральных линий в длинноволновую область в спектрах далёких галактик

По классификации, проведённой американским астрономом ***Эдвином Хабблом***, существует три вида галактик: *эллиптические*, *спиральные* и *неправильные*. Наша Галактика является спиральной (рис. 192). Солнечная система расположена между двумя спиральными ветвями, где количество звёзд сравнительно невелико.

---

[1] *Парсек* (пк) — это такое расстояние, с которого средний радиус земной орбиты (равный 1 а. е.), перпендикулярный лучу зрения, виден под углом в одну угловую секунду (1″), 1 пк = 3,26 св. года = 206 265 а. е.

[2] *Световой год* (св. год) — расстояние, пройденное светом в течение года.



Рис. 192. Млечный Путь — спиральная галактика

Большинство галактик сосредоточено в скоплениях. Вся система скоплений галактик (из которых нам пока известна только их часть) называется ***Метагалактикой***.

Для выяснения прошлого и будущего наблюдаемой Вселенной важное значение имеет создание теоретических моделей изучаемого объекта. Первые научно обоснованные модели Вселенной были созданы российским физиком ***Александром Александровичем Фридманом***. Для ответа на важные космологические вопросы, например о стационарности или нестационарности Вселенной, о её форме, радиусе кривизны и многие другие, он воспользовался созданной Эйнштейном в 1916 г. общей теорией относительности (теорией всемирного тяготения).

В 1922 г. Фридман проанализировал систему из десяти сложнейших уравнений теории относительности и пришёл к фундаментальному выводу о том, что ни при каких условиях их решение не может быть единственным. Это означает, что общая теория относительности не даёт *одного* определённого ответа на поставленные вопросы. Тем не менее Фридман понял, как можно получить ответ (хоть и неоднозначный) на вопрос, что может представлять собой Вселенная с точки зрения общей теории относительности. Он нашёл новые, вполне определённые решения уравнений общей теории относительности в виде трёх возможных моделей нестационарной Вселенной. Две из них описывали монотонно расширяющуюся Вселенную (с монотонно растущим радиусом кривизны), а третья — периодическую Вселенную (радиус кривизны её пространства сначала возрастал от нуля до некоторой величины, после чего уменьшался до нуля).



АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ ФРИДМАН

(1888—1925)

Российский математик, физик и геофизик. Создатель первых научно обоснованных моделей Вселенной, предсказал расширение Вселенной

Из этих моделей следует вывод о том, что Вселенная не может оста-

ваться постоянной, она должна расширяться или сжиматься под действием гравитационных сил.

Во времена Фридмана о движении галактик ничего не было известно. Но в 1929 г. Хаббл, наблюдая спектры далеких галактик с помощью телескопа с большим разрешением, обнаружил, что спектральные линии смещены в длинноволновую область, т. е. в сторону красных линий. В соответствии с *эффектом Доплера*[1] это означало, что расстояния между наблюдателем с Земли и галактиками увеличивалось, а частота исследуемого излучения уменьшалась. Более того, сопоставив расстояния до галактик и величину смещения в их спектрах, Хаббл открыл следующий закон (названный впоследствии его именем): **скорости удаления галактик пропорциональны расстоянию до них.**

$$\boldsymbol{v = HR},$$

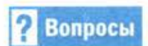
где v — скорость движения галактики относительно наблюдателя, R — расстояние до неё, H = 70 км/(с · Мпс) — *постоянная Хаббла*.

По смещению спектральных линий можно определять не только скорости галактик, но и расстояния до них.

Данный закон следовал из моделей Фридмана, описывающих расширяющуюся Вселенную. Поэтому можно сказать, что возможность расширения Вселенной была теоретически предсказана до открытия закона Хабблом.

---

[1] *Эффект Доплера* — изменение частоты принимаемых волн при относительном движении источника и наблюдателя (приёмника волн). При их сближении частота увеличивается, а при удалении друг от друга — уменьшается. Эффект Доплера наблюдается как для звуковых, так и для электромагнитных волн. Назван в честь австрийского физика ***Христиана Доплера***, теоретически обосновавшего этот эффект в 1842 г.



1. Что называется световым годом? 2. Какой вывод следовал из моделей Вселенной, полученных А. А. Фридманом? 3. Кто, когда и каким образом экспериментально подтвердил факт расширения Вселенной?

ЗАДАНИЕ

1. Определите центростремительное ускорение Луны при её обращении вокруг Земли. Необходимые для решения задачи данные найдите самостоятельно.
2. Используя дополнительную литературу и ресурсы Интернета, подготовьте доклад на тему «Планеты-карлики в Солнечной системе».

ИТОГИ ГЛАВЫ

САМОЕ ГЛАВНОЕ

Ниже даны начала утверждений и цифрами указаны возможные их окончания.

Перенесите в тетрадь начала утверждений и впишите в квадратные скобки номер подходящего окончания утверждения.

- **От губительного влияния мощного ультрафиолетового излучения Солнца землян защищает [ ].**
- **Источником энергии Солнца являются [ ].**
- **Звёзды типа Солнца на завершающем этапе своей эволюции становятся [ ].**
- **Вселенная под действием гравитационных сил может [ ].**

1. термоядерные реакции
2. красными гигантами
3. оставаться постоянной
4. белыми карликами
5. реакции радиоактивного распада
6. озоновый слой, находящийся в стратосфере и поглощающий это излучение
7. расширяться или сжиматься

ПРОВЕРЬ СЕБЯ

1. Формирование Солнечной системы началось приблизительно
   - А. 3,5 млрд лет назад
   - Б. 4,6 млн лет назад
   - В. 5 млн лет назад
   - Г. 5 млрд лет назад

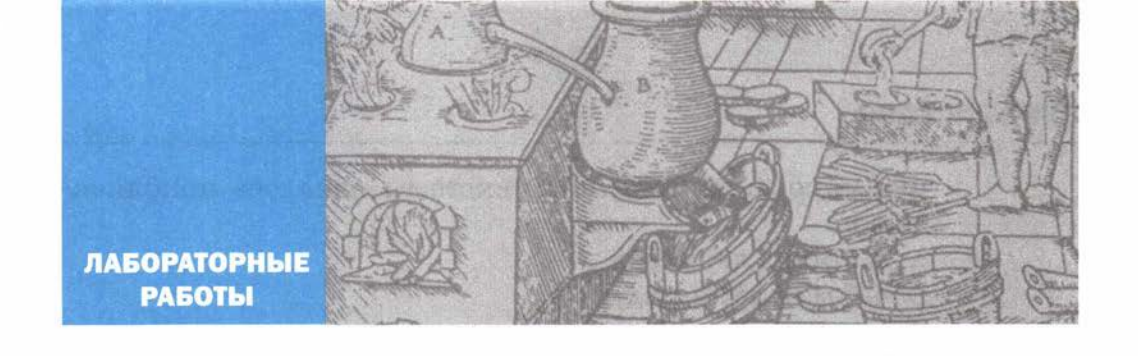
2. Число больших планет в Солнечной системе равно
   А. 13 Б. 9 В. 8 Г. 5

3. Направление обращения больших планет вокруг Солнца
   - А. совпадает с направлением вращения протооблака
   - Б. противоположно направлению вращения Солнца вокруг своей оси
   - В. может периодически меняться
   - Г. совпадает с направлением вращения Солнца у всех планет, за исключением Венеры и Урана

4. Существенное уменьшение массы Солнца могло бы привести к
   - А. выходу некоторых планет из Солнечной системы
   - Б. уменьшению радиусов орбит движения планет Солнечной системы
   - В. потеплению на Земле и других планетах
   - Г. увеличению мощности излучения (светимости) Солнца



Выполните задания, предложенные в электронном приложении.



№ 1 ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ БЕЗ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Цель работы Определить ускорение движения бруска по наклонной плоскости и его мгновенную скорость в конце заданного пути, пройденного за определённый промежуток времени.

Оборудование Прибор для изучения движения тел, штатив с муфтой и лапкой.

Теоретические обоснования

При равноускоренном движении без начальной скорости пройденное расстояние определяется по формуле:

$$s = \frac{at^2}{2},$$

отсюда

$$a = \frac{2s}{t^2}.$$

Зная ускорение, можно определить мгновенную скорость по формуле:

$$v = at.$$

Описание устройства и действия прибора

Прибор для изучения движения тел (рис. 193) состоит из направляющей *1* длиной 60—70 см; бруска *2* с пусковым магнитом *3*, закреплённым на торце алюминиевого стержня; электронного секундомера *4* с двумя датчиками *5*. Направляющая закрепляется в лапке штатива *6*,

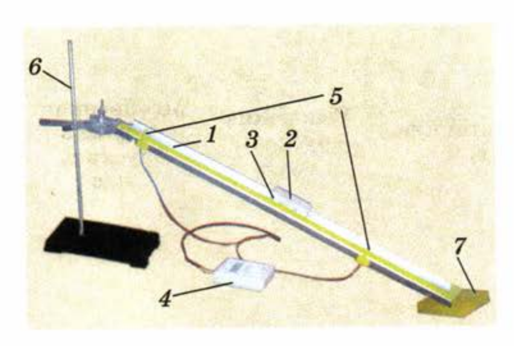


Рис. 193

под неё подкладывается коврик 7 из пористого пластика.

При прохождении пускового магнита мимо первого датчика отсчёт времени включается, а при прохождении второго — выключается, и на экране секундомера фиксируется значение промежутка времени t, за который брусок проходит расстояние s между датчиками.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Соберите установку по рисунку 193. Направляющую закрепите в лапке штатива под углом ≈ 30—$40°$ к плоскости столешницы.
2. Прочтите инструкцию на тыльной стороне секундомера по его включению и выключению. Включите секундомер.
3. Разместите брусок на направляющей так, чтобы его пусковой магнит находился на 1,5 см выше верхнего датчика.
4. Отпустите брусок. Определите расстояние s между датчиками и промежуток времени t, за который брусок прошёл это расстояние.
5. Не меняя расположения датчиков, проведите опыт ещё 2 раза.
6. По результатам трёх опытов рассчитайте среднее время движения бруска:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}.$$

7. Вычислите ускорение движения бруска и его мгновенную скорость в конце пути s по формулам:

$$a = \frac{2s}{t_{\text{ср}}^2} \text{ и } v = at_{\text{ср}}.$$

8. Результаты всех измерений и вычислений занесите в таблицу 3.

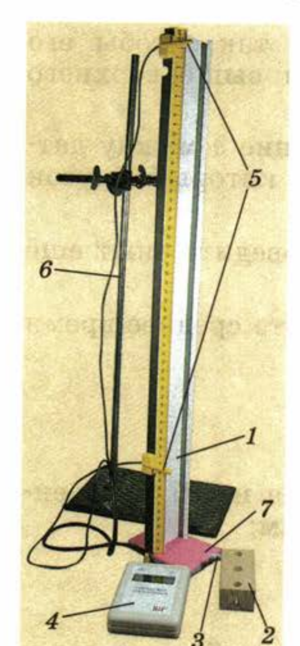
Таблица 3

№ опыта	Время t прохождения бруском расстояния s между датчиками, с	Среднее время движения $t_{ср}$, с	Расстояние s, м	Ускорение бруска a, м/с^2	Мгновенная скорость бруска v, м/с
1					
2					
3					

№ 2 ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Цель работы Измерить ускорение свободного падения с помощью прибора для изучения движения тел.

Оборудование Прибор для изучения движения тел; штатив с муфтой и лапкой.



а)

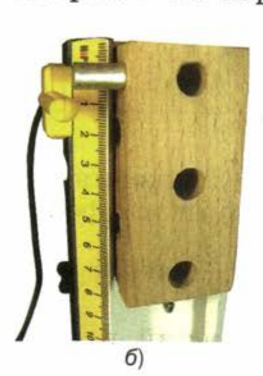

б)

Рис. 194

Описание устройства и действия прибора

Прибор для изучения движения тел (рис. 194) состоит из направляющей *1* длиной 60—70 см; бруска *2* с пусковым магнитом *3*, закреплённым на торце алюминиевого стержня; электронного секундомера *4* с двумя датчиками *5*. Направляющая укрепляется вертикально в лапке штатива *6*. Под рейку подкладывается коврик *7* из пористого пластика. Магнитные датчики *5* могут быть установлены в любом месте направляющей на магнитной резине, расположенной вдоль направляющей рядом со шкалой с миллиметровыми делениями.

В момент прохождения пускового магнита мимо первого датчика начинается отсчёт времени; при прохождении второго датчика на

экране секундомера высветится числовое значение промежутка времени t, за который брусок прошёл расстояние между датчиками.

Теоретические обоснования

Измерив расстояние s между установленными на направляющей датчиками времени и промежуток времени t, за который это расстояние было пройдено бруском, можно рассчитать ускорение свободного падения по формуле:

$$g = \frac{2s}{t^2}.$$

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Соберите установку по рисунку 194, *а*.
2. Прочтите инструкцию на тыльной стороне секундомера и включите его.
3. Приложите брусок к направляющей так, чтобы её пусковой магнит находился выше первого датчика времени (рис. 194, *б*).
4. Отпустите брусок. Определите промежуток времени, за который брусок проходит расстояние s между датчиками.
5. Не меняя расположения датчиков, проведите опыт ещё 4 раза. Рассчитайте среднее время движения бруска:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}.$$

6. Вычислите ускорение свободного падения по формуле:

$$g = \frac{2s}{t_{\text{ср}}^2}.$$

7. Занесите в таблицу 4 результаты всех измерений и вычислений.
8. Определите отклонение полученного вами значения g от действительного его значения $g_0 = 9{,}8$ м/с^2 (т. е. найдите разность между ними). Вычислите, какую часть (в %) составляет эта разность от значения g_0. Это отношение называется относительной погрешностью и обозначается буквой ε. Чем меньше относительная погрешность, тем выше точность измерений.

Таблица 4

№ опыта	Время t прохождения расстояния s между датчиками, с	Среднее время движения $t_{ср}$, с	Расстояние s, м	Ускорение свободного падения g, м/с^2
1				
2				
3				
4				
5				

Примечание: при аккуратной работе с прибором можно добиться того, чтобы относительная погрешность не превышала 10% .

№ 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЕРИОДА И ЧАСТОТЫ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ НИТЯНОГО МАЯТНИКА ОТ ЕГО ДЛИНЫ

Цель работы Выяснить, как зависят период и частота свободных колебаний нитяного маятника от его длины.

Оборудование Штатив с муфтой и лапкой, шарик с прикреплённой к нему нитью длиной 130 см, протянутой сквозь кусочек резины[1], часы с секундной стрелкой или секундомер сотового телефона.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Соберите установку по рисунку 195. При этом длина маятника должна быть равна 5 см, как указано в таблице 5

[1] Кусочек резины (в данном случае ластик) используется для того, чтобы нить не выскальзывала из лапки штатива и чтобы можно было быстро и точно установить нужную длину маятника. Нить протягивается сквозь резину с помощью иголки.

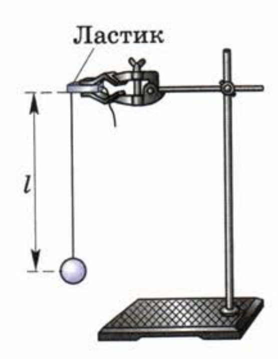


Рис. 195

для первого опыта. Длину l маятника измеряйте так, как показано на рисунке, т. е. от точки подвеса до середины шарика.

2. Для проведения первого опыта отклоните шарик от положения равновесия на небольшую амплитуду (1—2 см) и отпустите. Измерьте промежуток времени t, за который маятник совершит 30 полных колебаний. Результаты измерений запишите в таблицу 5.

Таблица 5

Физическая величина \ № опыта	1	2	3	4	5
l, см	5	20	45	80	125
N	30	30	30	30	30
t, с					
T, с					
ν, Гц					

3. Проведите остальные четыре опыта так же, как и первый. При этом длину l маятника каждый раз устанавливайте в соответствии с её значением, указанным в таблице 5 для данного опыта.

4. Для каждого опыта вычислите и запишите в таблицу 5 значения периода T колебаний маятника.

   Указание: при выполнении п. 4 и 5 штатив следует ставить на край стола, чтобы колебания маятника происходили над полом.

5. Для каждого опыта рассчитайте значения частоты ν колебаний маятника по формуле: $\nu = \frac{1}{T}$ или $\nu = \frac{N}{t}$.

   Полученные результаты занесите в таблицу 5.

6. Сделайте выводы о том, как зависят период и частота свободных колебаний маятника от его длины. Запишите эти выводы.

7. Ответьте на вопросы.
Увеличили или уменьшили длину маятника, если: а) период его колебаний сначала был 0,3 с, а после изменения длины стал 0,1 с; б) частота его колебаний вначале была равна 5 Гц, а потом уменьшилась до 3 Гц?

Дополнительное задание

Цель задания Выяснить, какая математическая зависимость существует между длиной маятника и периодом его колебаний.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Пользуясь данными таблицы 5, вычислите и запишите приведённые в таблице 6 отношения периодов и длин (при вычислении отношений периодов округляйте результаты до целых чисел).

Таблица 6

$\frac{T_2}{T_1} =$	$\frac{T_3}{T_1} =$	$\frac{T_4}{T_1} =$	$\frac{T_5}{T_1} =$
$\frac{l_2}{l_1} =$	$\frac{l_3}{l_1} =$	$\frac{l_4}{l_1} =$	$\frac{l_5}{l_1} =$

2. Сравните результаты всех четырёх столбцов таблицы 6 и постарайтесь найти в них общую закономерность. На основании этого выберите из пяти приведённых ниже равенств те, которые верно отражают зависимость между периодом колебаний маятника T и его длиной l:

1) $\frac{T_k}{T_1} = \frac{l_k}{l_1}$;

2) $\frac{T_k}{T_1} = \frac{l_1}{l_k}$;

3) $\frac{T_k}{T_1} = \sqrt{\frac{l_k}{l_1}}$;

4) $\sqrt{\frac{T_k}{T_1}} = \frac{l_k}{l_1}$;

5) $\left(\frac{T_k}{T_1}\right)^2 = \frac{l_k}{l_1}$,

где k может принимать следующие значения: 2, 3, 4, 5; например, $\left(\frac{T_3}{T_1}\right)^2 = \frac{l_3}{l_1}$.

3. Из пяти приведённых ниже утверждений выберите верное.
При увеличении длины нити маятника в 4 раза период его колебаний: а) увеличивается в 4 раза; б) уменьшается в 4 раза; в) увеличивается в 2 раза; г) уменьшается в 2 раза; д) увеличивается в 16 раз.

№ 4 ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Цель работы Изучить явление электромагнитной индукции.

Оборудование Миллиамперметр, катушка-моток, магнит дугообразный, источник питания, катушка с железным сердечником от разборного электромагнита, реостат, ключ, провода соединительные, модель генератора электрического тока (одна на класс).

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ



Рис. 196

1. Подключите катушку-моток к зажимам миллиамперметра.
2. Наблюдая за показаниями миллиамперметра, подводите один из полюсов магнита к катушке, потом на несколько секунд остановите магнит, а затем вновь приближайте его к катушке, вдвигая в неё (рис. 196). Запишите, возникал ли в катушке индукционный ток во время движения магнита относительно катушки; во время его остановки.
3. Запишите, менялся ли магнитный поток Ф, пронизывающий катушку, во время движения магнита; во время его остановки.
4. На основании ваших ответов на предыдущий вопрос сделайте и запишите вывод о том, при каком условии в катушке возникал индукционный ток.
5. Почему при приближении магнита к катушке магнитный поток, пронизывающий эту катушку, менялся? (Для ответа на этот вопрос вспомните, во-первых, от каких величин зависит магнитный поток Ф и, во-вторых, одинаков ли модуль вектора индукции $\vec{B}$ магнитного поля постоянного магнита вблизи этого магнита и вдали от него.)
6. О направлении тока в катушке можно судить по тому, в какую сторону от нулевого деления отклоняется стрелка миллиамперметра.
   Проверьте, одинаковым или различным будет направление индукционного тока в катушке при приближении к ней и удалении от неё одного и того же полюса магнита.

7. Приближайте полюс магнита к катушке с такой скоростью, чтобы стрелка миллиамперметра отклонялась не более чем на половину предельного значения его шкалы.

Повторите тот же опыт, но при большей скорости движения магнита, чем в первом случае.

При большей или меньшей скорости движения магнита относительно катушки магнитный поток Ф, пронизывающий эту катушку, менялся быстрее?

При быстром или медленном изменении магнитного потока сквозь катушку сила тока в ней была больше?

На основании вашего ответа на последний вопрос сделайте и запишите вывод о том, как зависит модуль силы индукционного тока, возникающего в катушке, от скорости изменения магнитного потока Ф, пронизывающего эту катушку.

8. Соберите установку для опыта по рисунку 197.

9. Проверьте, возникает ли в катушке-мотке *1* индукционный ток в следующих случаях:

а) при замыкании и размыкании цепи, в которую включена катушка *2*;

б) при протекании через катушку *2* постоянного тока;

в) при увеличении и уменьшении силы тока, протекающего через катушку *2*, путём перемещения в соответствующую сторону движка реостата.

10. В каких из перечисленных в пункте 9 случаев меняется магнитный поток, пронизывающий катушку *1*? Почему он меняется?

11. Пронаблюдайте возникновение электрического тока в модели генератора (рис. 198). Объясните, почему в рамке, вращающейся в магнитном поле, возникает индукционный ток.

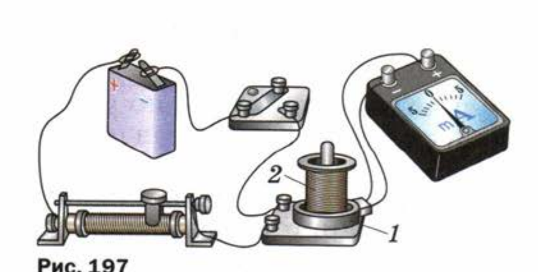


Рис. 197



Рис. 198

№ 5 НАБЛЮДЕНИЕ СПЛОШНОГО И ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ

Цель работы Наблюдать сплошной спектр от полученной на экране вертикальной световой полосы, линейчатые спектры от разряда в разреженных газах.

Оборудование общее для всего класса Проекционный аппарат, раздвижная щель, набор спектральных трубок (например, с водородом, кислородом и неоном) с источником питания (рис. 199), плоскопараллельная пластина со скошенными гранями или однотрубный спектроскоп (для каждого ученика).

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ



Рис. 199

1. Расположите стеклянную пластину горизонтально перед глазом. Сквозь скошенные грани пластины, образующие угол 45°, наблюдайте на экране светлую вертикальную полоску, образованную прошедшим через раздвижную щель светом от проекционного аппарата.
2. Запишите, какой вид спектра вы наблюдаете, сколько в нём основных цветов и в какой последовательности они расположены.
3. Пронаблюдайте спектр полоски, рассматривая её сквозь скошенные грани пластины, образующие угол 60°. Запишите, чем этот спектр отличается от предыдущего. Сделайте и запишите вывод о зависимости протяжённости спектра от преломляющего угла призмы, в которой преломляется пучок белого света.
4. При наличии однотрубного спектроскопа пронаблюдайте световую полоску через него. Отличается ли спектр, полученный с помощью спектроскопа, от спектров, полученных с помощью плоскопараллельной пластины?
5. Пронаблюдайте через скошенные грани пластины или через однотрубный спектроскоп спектры, полученные от светящихся газоразрядных трубок. Какой вид спектров вы наблюдали? Нарисуйте в тетрадях примерный вид спектра от разряда в каждом из газов.

№ 6 ИЗМЕРЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО РАДИАЦИОННОГО ФОНА ДОЗИМЕТРОМ

(выполняется коллективно под руководством учителя)

Цель работы Измерить мощность дозы радиоактивного фона бытовым дозиметром.

Оборудование Дозиметр «Сосна» (рис. 200).



Рис. 200

Толкование используемых терминов

Фон радиоактивный — естественный радиационный фон, создаваемый ионизирующим излучением, источником которого являются космические лучи и так называемые естественные радионуклиды (т. е. существующие в природе ядра радиоактивных элементов).

Ионизирующее излучение — различные виды частиц и физических полей, способных ионизировать вещество.

Космические лучи представляют собой поток частиц высоких энергий, приходящих на Землю из космоса (солнечная радиация).

Естественные радионуклиды повсеместно присутствуют в окружающей среде, а также в животных и растительных организмах. Фоновому облучению подвергаются все живые организмы Земли, в том числе человек. В зависимости от высоты над уровнем моря и содержания радионуклидов в окружающей среде радиационный фон колеблется в значительных пределах. Для его измерения используют счётчики Гейгера—Мюллера (см. § 54 учебника).

В бытовых дозиметрах используется счётчик жёсткого (т. е. высокоэнергетического) β- и γ-излучения, способный регистрировать мощность дозы в диапазоне 0,004—40 мкР/с (микрорентген в секунду).

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Положите дозиметр на стол и включите его.
2. Запустите отсчёт импульсов нажатием кнопки «Пуск».
3. Через 40 с подсчёт импульсов будет прекращён (перестанут мерцать точки), на экране высветится значение мощности дозы фонового излучения (в мкР/ч).

№ 7 ИЗУЧЕНИЕ ДЕЛЕНИЯ ЯДРА АТОМА УРАНА ПО ФОТОГРАФИИ ТРЕКОВ

Цель работы Применить закон сохранения импульса для объяснения движения двух ядер, образовавшихся при делении ядра атома урана.

Оборудование Фотография треков заряженных частиц (рис. 201), образовавшихся при делении ядра атома урана.

Пояснения На данной фотографии вы видите треки двух осколков, образовавшихся при делении ядра атома урана, захватившего нейтрон. Ядро урана находилось в точке g, указанной стрелочкой.

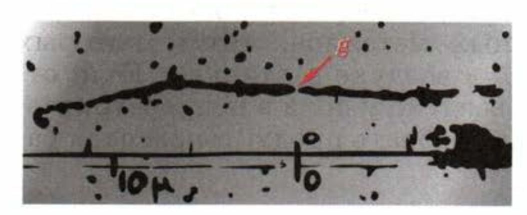


Рис. 201

По трекам видно, что осколки ядра урана разлетелись в противоположных направлениях (излом левого трека объясняется столкновением осколка с ядром одного из атомов фотоэмульсии, в которой он двигался).

Задание 1 Пользуясь законом сохранения импульса, объясните, почему осколки, образовавшиеся при делении ядра атома урана, разлетелись в противоположных направлениях.

Задание 2 Известно, что осколки ядра урана представляют собой ядра атомов двух разных химических элементов (например, бария, ксенона и др.) из середины таблицы Д. И. Менделеева.

Одна из возможных реакций деления урана может быть записана в символическом виде следующим образом:

$$_{92}\text{U} + {}_0n \rightarrow {}_{56}\text{Ba} + {}_Z\text{X} + 2 \cdot {}_0n,$$

где символом $_Z\text{X}$ обозначено ядро атома одного из химических элементов.

Пользуясь законом сохранения электрического заряда и таблицей Д. И. Менделеева, определите, что это за элемент.

№ 8 ОЦЕНКА ПЕРИОДА ПОЛУРАСПАДА НАХОДЯЩИХСЯ В ВОЗДУХЕ ПРОДУКТОВ РАСПАДА ГАЗА РАДОНА

Цель работы. Оценить период полураспада продуктов распада радона с помощью бытового дозиметра.

Оборудование. Дозиметр «Сосна», бытовой пылесос, ватный диск, решётка.

Теоретическое обоснование

Радон — инертный газ, получающийся при распаде ядер урана. Наиболее стабильный изотоп (^{222}Rn) имеет период полураспада 3,8 сут. При комнатной температуре радон тяжелее воздуха. Если длительное время не проветривать помещение, то радон скапливается в области, близкой к полу. При распаде радона образуются короткоживущие изотопы различных металлов, атомы которых оседают на находящихся в воздухе пылинках. Если отфильтровывать пыль из воздуха у пола в непроветриваемом помещении, то можно собрать продукты распада радона.

Подготовка эксперимента

1) В непроветриваемое помещение (желательно подвал) принесите пылесос или бытовой фен.
2) На всасывающее воздух отверстие пылесоса (или фена) установите решётку и сверху ватный диск.
3) Подключите пылесос к сети и включите. Поток воздуха прижмёт ватный диск и решётку к входному отверстию пылесоса.
4) Установите пылесос так, чтобы отверстие было невысоко над полом в углу помещения.
5) Прокачивайте воздух не менее 5—10 мин.
6) Снимите ватный диск.
7) Следует использовать полученный препарат в течение 5 мин.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Включите дозиметр.
2. Откройте металлическую крышку на тыльной стороне защитного кожуха дозиметра.
3. Нажмите кнопку «Пуск» для начала измерений.

4. Дождитесь остановки подсчёта импульсов. Вы измерили мощность дозы фонового излучения $P_ф$. Занесите показания дозиметра в таблицу 7.

Таблица 7

№ опыта	Время t, с	$P_ф$, мкР/ч	P, мкР/ч	ΔP, мкР/ч

5. Положите препарат на стол. Поверх него положите дозиметр так, чтобы окно на его тыльной стороне было над препаратом.
6. Запустите отсчёт импульсов. Вы измеряете суммарную мощность P дозы излучения продуктов распада радона и фонового излучения. После окончания счёта занесите показание дозиметра в таблицу 7.
7. Повторяйте измерения в течение 20 мин один раз в минуту, результаты каждого измерения заносите в таблицу 7.
8. Рассчитайте мощность дозы излучения продуктов распада радона $\Delta P = P - P_ф$ и запишите значение в таблицу 7.
9. Постройте график зависимости мощности дозы излучения продуктов распада радона от времени.
10. Оцените период полураспада радона.
11. Ответьте на вопрос: как сделать часы, измеряющие временны́е промежутки в тысячи лет?

№ 9 ИЗУЧЕНИЕ ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ГОТОВЫМ ФОТОГРАФИЯМ

Цель работы Объяснить характер движения заряженных частиц.

Оборудование Фотографии треков заряженных частиц, полученных в камере Вильсона, пузырьковой камере и фотоэмульсии.

Пояснения При выполнении данной лабораторной работы следует помнить, что:

а) длина трека тем больше, чем больше энергия частицы и чем меньше плотность среды;

б) толщина трека тем больше, чем больше заряд частицы и чем меньше её скорость;

в) при движении заряженной частицы в магнитном поле трек её получается искривлённым, причём радиус кривизны трека тем больше, чем больше масса и скорость частицы и чем меньше её заряд и модуль индукции магнитного поля;

г) частица двигалась от конца трека с бóльшим радиусом кривизны к концу с меньшим радиусом кривизны (радиус кривизны по мере движения уменьшается, так как из-за сопротивления среды уменьшается скорость частицы).

Задание 1 На двух из трёх представленных вам фотографий (рис. 202) изображены треки частиц, движущихся в магнитном поле. Укажите на каких. Ответ обоснуйте.

Задание 2 Рассмотрите фотографию треков α-частиц, двигавшихся в камере Вильсона (рис. 202, *а*), и ответьте на вопросы.

а) В каком направлении двигались α-частицы?

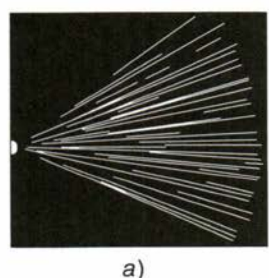
б) Длина треков α-частиц примерно одинакова. О чём это говорит?

в) Как менялась толщина трека по мере движения частиц? Что из этого следует?

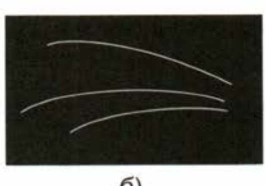
Задание 3 На рисунке 202, *б* дана фотография треков α-частиц в камере Вильсона, находившейся в магнитном поле. Определите по этой фотографии:

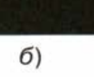
а) почему менялись радиус кривизны и толщина треков по мере движения α-частиц;

б) в какую сторону двигались частицы.



а)





б)



в)

Рис. 202

Задание 4. На рисунке 202, *в* дана фотография трека электрона в пузырьковой камере, находившейся в магнитном поле. Определите по этой фотографии:

а) почему трек имеет форму спирали;

б) в каком направлении двигался электрон;

в) что могло послужить причиной того, что трек электрона на рисунке 202, *в* гораздо длиннее треков α-частиц на рисунке 202, *б*.

ОТВЕТЫ К УПРАЖНЕНИЯМ

Упр. 5. 2. 1,5 м/с^2. 3. 0,5 м/с^2.

Упр. 6. 1. 1 м/с. 2. 10 с. 5. $a_1 = 0,5$ м/с^2; $a_2 = 1$ м/с^2.

Упр. 7. 1. 31,25 м. 2. 150 м. 3*. *Указания*: замените в формуле $S = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t$ время t его выражением, полученным из формулы для расчёта ускорения (§ 5), а площадь S — проекцией перемещения s_x; проведите преобразования с учётом того, что $(a + b)(a - b) = a^2 - b^2$ и что $a + b = b + a$.

Упр. 8. 1. 0,4 м; 0,8 м/с^2. 2*. 7 м/с.

Упр. 9. 5*. 248 м/с при движении на восток и 198 м/с при движении на запад.

Упр. 11. 2. 36,8 кН. 3. 9,6 Н. 4. 6 м/с^2.

Упр. 12. 2. Не будет. 3. а) $F_{2x} = 0,3$ Н, $F_{1x} = -0,3$ Н; б) $F_{1x} = 0,1$ Н, $F_{2x} = -0,1$ Н; г) $F_x = 0,4$ Н.

Упр. 13. 1. 78,4 м. 3. 3 с; 5 м; 25 м.

Упр. 14. 1. 1 с; 4,9 м.

Упр. 15. 4. в) При движении вверх $\vec{v}$ и $\vec{g}$ направлены в противоположные стороны, а при движении вниз — в одну и ту же.

Упр. 16. 2. Притягивается с такой же по модулю силой. 6*. $h_1 = R_3$; $h_2 = 2R_3$.

Упр. 17. 3*. На участках AB и CD. Могла.

Упр. 18. 2. $2 \cdot 10^{-4}$ м/с^2. 4*. 3600. Секундная. 5*. а) $\approx 1,9 \cdot 10^{20}$ Н; б) $\approx 2,7 \cdot 10^{-3}$ м/с^2; в) ≈ 1 км/с.

Упр. 19*. 1. 6,67 км/с. 2. $1,7 \cdot 10^3$ км.

Упр. 20. 1. 0,02 кг · м/с; –0,02 кг · м/с. 2. $5 \cdot 10^3$ кг · м/с. 4. 0,9 м/с.

Упр. 21. 1. 2,25 м/с. 2. ≈ 33 м/с.

Упр. 22. 2. 10 м/с. 3. 1,25 м.

Упр. 23. 2. а) Под действием силы упругости шнуров.

Упр. 24. 4. 10 Гц. 6. 40 см.

Упр. 26. 3. 2 с.

Упр. 27. 1. 20 м/с.

Упр. 29. 2. Понизится. 3. Понизится.

Упр. 30. 6. 20 м/с.

Упр. 31. 1. Да. 2. N, M. 3. а) C и D; б) A; в) можно.

Упр. 32. 4*. В первом — магнитными, а во втором — электрическими.

Упр. 33. 1. Вправо. 2. От A к B.

Упр. 34. 1. 0,5 Тл.

Упр. 41. 1. $5 \cdot 10^5$ Гц. 3. Нельзя.

Упр. 46. 3. В 6 раз.

Упр. 48. 1. Нуклонов — 9, протонов — 4, нейтронов — 5.

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание

Перышкин Александр Васильевич
Гутник Елена Моисеевна

ФИЗИКА

9 класс

Учебник

Зав. редакцией *Е. Н. Тихонова*
Ответственный редактор *И. Г. Власова*
Оформление *О. В. Беловодова*
Художественный редактор *А. А. Шувалова*
Художник *Л. Я. Александрова*
Технический редактор *С. А. Толмачева*
Компьютерная верстка *С. Л. Мамедова*
Корректор *Г. И. Мосякина*

В соответствии с Федеральным законом от 29.12.2010 г. № 436-ФЗ знак информационной продукции на данное издание не ставится

Сертификат соответствия
№ РОСС RU. АЕ51. Н 16508.



Подписано в печать 11.03.14. Формат 70 × 90 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура «Школьная». Печать офсетная.
Усл. печ. л. 23,40. Тираж 100 000 экз. Заказ № 37361 (П-Sm).

ООО «ДРОФА». 127018, Москва, Сущевский вал, 49.

Предложения и замечания по содержанию и оформлению книги просим направлять в редакцию общего образования издательства «Дрофа»: 127018, Москва, а/я 79. Тел.: (495) 795-05-41. E-mail: chief@drofa.ru

По вопросам приобретения продукции издательства «Дрофа» обращаться по адресу: 127018, Москва, Сущевский вал, 49.
Тел.: (495) 795-05-50, 795-05-51. Факс: (495) 795-05-52.

Сайт ООО «ДРОФА»: www.drofa.ru

Электронная почта: sales@drofa.ru

Тел.: 8-800-200-05-50 (звонок по России бесплатный)

Отпечатано в филиале «Смоленский полиграфический комбинат»
ОАО «Издательство «Высшая школа».
214020, Смоленск, ул. Смольянинова, 1.
Тел.: +7 (4812) 31-11-96. Факс: +7 (4812) 31-31-70
E-mail: spk@smolpk.ru http://www.smolpk.ru

Периодическая система химиче

ПЕРИОДЫ	ГРУППЫ: A I B	A II B	A III B	A IV B	A
1	(H)				
2	Li 3 6,941 Lithium Литий	Be 4 9,01218 Beryllium Бериллий	B 5 10,811 Borum Бор	C 6 12,011 Carboneum Углерод	N Nitroge Азот
3	Na 11 22,98977 Natrium Натрий	Mg 12 24,30 Magnesium Магний	Al 13 26,98154 Aluminium Алюминий	Si 14 28,0855 Silicium Кремний	P Phosph Фосфо
4	K 19 39,0983 Kalium Калий	Ca 20 40,078 Calcium Кальций	21 Sc 44,95591 Scandium Скандий	22 Ti 47,88 Titanium Титан	23 50,941
	29 Cu 63,546 Cuprum Медь	30 Zn 65,39 Zincum Цинк	Ga 31 69,723 Gallium Галлий	Ge 32 72,59 Germanium Германий	As Arsenic Мышья
5	Rb 37 85,4678 Rubidium Рубидий	Sr 38 87,62 Strontium Стронций	39 Y 88,9059 Yttrium Иттрий	40 Zr 91,224 Zirconium Цирконий	41 92,906
	47 Ag 107,8682 Argentum Серебро	48 Cd 112,41 Cadmium Кадмий	In 49 114,82 Indium Индий	Sn 50 118,710 Stannum Олово	Sb Stibium Сурьм
6	Cs 55 132,9054 Cesium Цезий	Ba 56 137,33 Barium Барий	57 La* 138,9055 Lanthanum Лантан	72 Hf 178,49 Hafnium Гафний	73 180,94
	79 Au 196,9665 Aurum Золото	80 Hg 200,59 Hydrargyrum Ртуть	Tl 81 204,383 Thallium Таллий	Pb 82 207,2 Plumbum Свинец	Bi Bismuth Висму
7	Fr 87 [223] Francium Франций	Ra 88 [226] Radium Радий	89 Ac** [227] Actinium Актиний	104 Rf [261] Rutherfordium Резерфордий	105 [262]

*ЛАНТАНОИДЫ	58 Ce 140,12 Cerium Церий	59 Pr 140,9077 Praseodymium Празеодим	60 Nd 144,24 Neodymium Неодим	61 Pm [145] Promethium Прометий	62 Sm 150,36 Samarium Самарий	63 Eu 151,96 Europium Европий	64 157
**АКТИНОИДЫ	90 Th 232,0381 Thorium Торий	91 Pa [231] Protactinium Протактиний	92 U 238,0289 Uranium Уран	93 Np [237] Neptunium Нептуний	94 Pu [244] Plutonium Плутоний	95 Am [243] Americium Америций	96 [24